
BACHELORARBEIT

Marcel Macher

**Modellierung und Simulation
eines Motorenprüfstandes zur
Nachbildung der Trägheit
eines Gesamtfahrzeuges mit
Hilfe des Belastungsmotors**

2014/2015

BACHELORARBEIT

Modellierung und Simulation eines Motorenprüfstandes zur Nachbildung der Trägheit eines Gesamtfahrzeuges mit Hilfe des Belastungsmotors

Autor:
Marcel Macher

Studiengang:
Elektro- und Informationstechnik

Seminargruppe:
EI11wE-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer:
Dipl. Ing. (FH) Jan Roloff

Einreichung:
Mittweida, 13.02.15

BACHELOR THESIS

Modeling and simulation of an engine test bed to replicate the inertia of complete vehicles by means of the stress engine

author:

Marcel Macher

course of studies:

Elektro- und Informationstechnik

seminar group:

EI11wE-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

second examiner:

Dipl. Ing. (FH) Jan Roloff

submission:

Mittweida, 13.02.15

Bibliografische Angaben

Nachname, Vorname: Macher Marcel

Modellierung und Simulation eines Motorenprüfstandes zur Nachbildung der Trägheit eines Gesamtfahrzeuges mit Hilfe des Belastungsmotors.

Modeling and simulation of an engine test bed to replicate the inertia of complete vehicles by means of the stress engine.

29 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Bachelorarbeit, 2015

Kurzreferat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Simulationsmodells für einen Motorenprüfstand unter Verwendung der Software *Portunus* (Version 5.2.10.0). Dieser Prüfstand wird später zur Auslegung und Applikation eines Fahrzeugantriebsstranges dienen und soll deshalb im Vorfeld durch diese Arbeit modelliert und simuliert werden, um sein grundlegendes Verhalten darstellbar zu machen. Es ist daher notwendig, dass der Motorenprüfstand durch den Belastungsmotor den Drehzahlverlauf des späteren Gesamtfahrzeuges in einer guten Näherung abbildet. Um dies zu erreichen werden im Verlauf dieser Arbeit zwei Gleichungen hergeleitet, welche die grundlegenden Zusammenhänge widerspiegeln. Darauf aufbauend wird der Motorenprüfstand modelliert und stufenweise erweitert. Eine Auswertung der Simulationsergebnisse (z.B. Drehzahlverläufe) einer jeden Stufe wird am Ende der jeweiligen Stufe durchgeführt.

Hinweis:

Der Standort des Prüfstandes ist das Labor der Professur „Antriebstechnik“ an der Hochschule Mittweida und besteht aus zwei Synchronmotoren mit jeweils zugehörigem Inverter und dem Steuergerät.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname

Bacheloraufgabenstellung für Marcel Macher

Thema: Modellierung und Simulation eines Motorenprüfstandes zur Nachbildung der Trägheit eines Gesamtfahrzeuges mit Hilfe des Belastungsmotors

Mittweida, 08.12.2014

Während der Entwicklung eines Fahrzeugantriebsstranges ist ein Motorenprüfstand wichtig für dessen Auslegung und Applikation. Um auf unterschiedliche Fahrzeugmassen reagieren zu können, muss der Antriebsmotor mit unterschiedlichen Trägheitsmomenten belastet werden. Dafür ist der Bremsmotor so anzusteuern und zu parametrieren, dass er für den Antriebsmotor unterschiedliche Trägheitsmomente simuliert. Damit ist der Wechsel rotierender Trägheiten auf der Motorwelle des Antriebsmotors überflüssig, was einen entscheidenden Vorteil, hinsichtlich zeitlicher und materieller Ersparnis, ergibt.

Arbeitspakete:

1. Theoretische Herleitung der Bestimmungsgleichungen für einen 2 Motorenprüfstand:
 - Umsetzung der Bewegungsgleichungen mit den regelungstechnischen Blöcken aus der Bibliothek des Simulationstools Portunus
 - Umrechnung eines angenommenen translatorisch bewegten Fahrzeuges in eine rotierende Massenträgheit auf der Welle des Antriebsmotors
2. Entwicklung des Simulationsmodells:
 - Entwicklung einer geeigneten Regelstruktur zur Abbildung von 2 gleichen, starr gekoppelten Motoren
 - Ermittlung des Beschleunigungsmomentes des Antriebsmotors, welches sich aus der Vorgabe des Fahrpedals ergibt
 - Berechnung des Momentes für den Bremsmotor, um für den Antriebsmotor die Trägheit des Gesamtfahrzeuges simulieren zu können
 - Validierung des simulierten Trägheitsmomentes im Vergleich zur realen Trägheit im Simulationstool Portunus
 - Auswertung der Reaktion auf Störgrößen, die sich am Motorenprüfstand durch Beschleunigung oder Bremsung ergeben können

Hochschulbetreuer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Inhaltsverzeichnis

Bibliografische Angaben	IV
Eigenständigkeitserklärung	V
Aufgabenstellung	VI
Inhaltsverzeichnis	VII
1 Motivation	1
2 Präzisierung der Aufgabenstellung	2
3 Vorstellung des Simulationsprogrammes Portunus	5
4 Umsetzung der Bewegungsgleichung mit Portunus	7
4.1 Umrechnung des Drehmomentes in eine Drehzahl	7
4.2 Umrechnung einer Drehzahl in ein Drehmoment.....	8
5 Herleitung des theoretischen Bremsmomentes	9
6 Modellentwicklung mit Portunus	12
6.1 Stufe 1	12
6.1.1 Abschnitte der Stufe 1	12
6.1.2 Betrachtung der Simulationsergebnisse von Stufe 1	16
6.2 Stufe 2	17
6.2.1 Abschnitte der Stufe 2.....	17
6.2.2 Betrachtung der Simulationsergebnisse von Stufe 2	20
6.3 Stufe 3	21
6.3.1 Abschnitte der Stufe 3.....	22
6.3.2 Betrachtung der Simulationsergebnisse von Stufe 3	24
6.4 Stufe 4	24
6.4.1 Abschnitte der Stufe 4.....	25
6.4.2 Betrachtung der Simulationsergebnisse von Stufe 4	25
7 Abschließende Bemerkungen	28
7.1 Bewertung der Simulationsmodelle	28
7.2 Einschätzung zur späteren Umsetzung	28
Formelzeichenverzeichnis.....	IX
Abbildungsverzeichnis	X
Literaturverzeichnis	XI
Anlagen.....	XII

Anlage 1: Simulationsdatei der Stufe 1	A-1
Anlage 2: Simulationsdatei der Stufe 2	A-2
Anlage 3: Simulationsdatei der Stufe 3	A-3
Anlage 4: Simulationsdatei der Stufe 4	A-4
Anlage 5: Simulationsdatei der Stufe X (1b).....	A-5

1 Motivation

In der heutigen Zeit sind Elektromotoren allgegenwärtig und erleichtern uns Menschen in vielerlei Hinsicht den Alltag und die Arbeit. Sei es in der Küche, im Handwerksbereich oder im Automobil.

Während Elektromotoren in älteren Kraftfahrzeugen meist nur als Fensterheber oder Scheibenwischer ihre Anwendung fanden, werden derzeit Elektromotoren auch zur Unterstützung des Verbrennungsmotors eingesetzt. Die sogenannten Hybridfahrzeuge werden meist im städtischen Bereich durch den Elektromotor in Bewegung versetzt und schalten bei Notwendigkeit den Verbrennungsmotor dazu. Somit ist eine Reduzierung der CO₂-Emissionen in den Städten möglich. Weiterhin setzt man heutzutage schon reine Elektroantriebe ein, so wurde beispielsweise der Prototyp des Muldenkippers BelAZ 75710 mit vier 1200 kW Elektromotoren ausgestattet (vgl. [1]). Der Elektromotor wird somit in naher Zukunft in der Welt der Fahrzeugantriebstechnik zu einer festen Größe werden.

Vor allem aber da die fossilen Brennstoffe, wie beispielsweise Erdöl, von Tag zu Tag geringer werden sowie der drohende Klimawandel immer deutlicher zu spüren ist und nicht nur theoretische Diskussionen entfacht, bietet der Einsatz von Elektromotoren im Automobil einige Möglichkeiten und Chancen um etwas zur Nachhaltigkeit von fossilen Brennstoffen und gegen den Klimawandel bewirken zu können.

Dieser Einsatz von Elektromotoren in Kombination mit entsprechender Akkumulatoren Technologie im Automobil wird häufig mit dem Begriff *Elektromobilität* umschrieben und ist ein bedeutendes Vorhaben zur Zukunftsgestaltung. In Hinblick dessen ist die Anfertigung dieser Arbeit mit den Gedanken verbunden einen kleinen Teil zu diesem Vorhaben beitragen zu können.

2 Präzisierung der Aufgabenstellung

Die Zielstellung der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung und Verifizierung eines Simulationsmodells für einen Motorenprüfstand. Dieser Prüfstand soll die tatsächliche Fahrzeugmasse durch zwei baugleiche Synchronmotoren, die starr mit einer Welle verbunden sind (Direktantrieb, siehe Abbildung 1), einstellen und somit den realen Drehzahlverlauf des Gesamtfahrzeuges nachbilden. Dabei fungiert ein Motor als Antriebsmotor des Systems und der andere als Belastungsmotor, welcher die Trägheit des Gesamtfahrzeuges generiert.

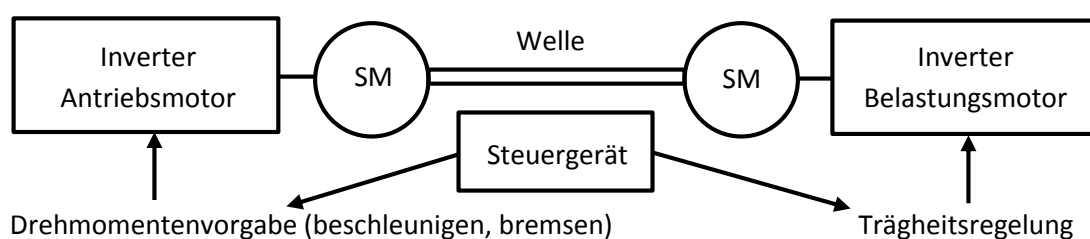


Abbildung 1: grobe schematische Darstellung des getriebelosen Prüfstandes

Das Simulationsmodell soll deshalb im Vorfeld das grundlegende Verhalten und die Art der späteren Ansteuerung des Motorprüfstandes wiedergeben. Weiterhin soll eine variable Einstellung des Fahrzeugträgheitsmomentes möglich sein, um auf eine einfache Weise zwischen unterschiedlichen Fahrzeugmassen umschalten zu können, wodurch sich der Drehzahlverlauf verändert (Abbildung 2).

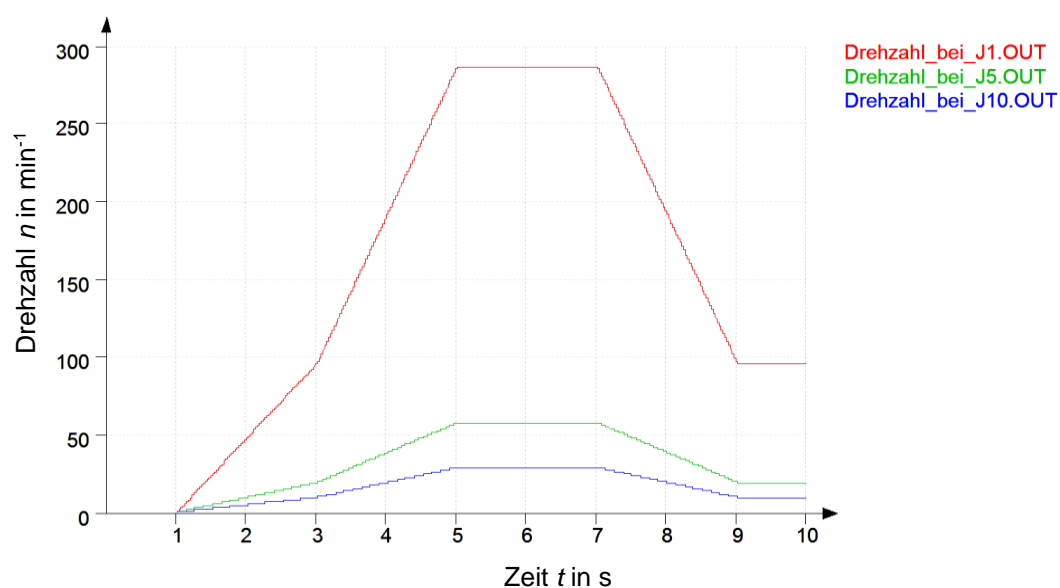


Abbildung 2: Drehzahlverlauf bei unterschiedlichen Trägheitsmomenten J

Dieses Anliegen dient der Umsetzung eines sehr bedeutsamen Gedankens, denn ein Prüfstand mit variablem Trägheitsmoment ist in vielerlei Hinsicht vorteilhaft und nützlich. So wäre eine Änderung binnen Sekunden softwaremäßig durchgeführt und würde keine baulichen Handgriffe mehr notwendig machen. Für das Zusammenwirken der Prüfstandsmotoren ist daher vorgesehen, dass der Belastungsmotor generatorisch Drehmoment von der Welle aufnimmt, wenn der Antriebsmotor motorisch auf die Welle wirkt. Im Fall einer Drehzahlreduzierung wo der Antriebsmotor generatorisch arbeiten soll, ist es zur Trägheitsnachbildung erforderlich dass der Belastungsmotor dann motorisch wirkt.

Die Berechnung des notwendigen Bremsmomentes, was der Belastungsmotor zur Trägheitsnachbildung aufbringen muss, soll auf der Grundlage des vorhandenen Drehzahlgradienten der Welle erfolgen. Dies meint, dass als Erstes eine Drehzahlmessung erfolgen soll, um danach die Drehmomentenvorgabe für den Antriebsmotor, welche von den Pedalen kommt, rekonstruieren zu können. Nach der Ermittlung des jeweiligen Vorgabemomentes an den Antriebsmotor, hat das Simulationsprogramm die Aufgabe durch regelungstechnische Maßnahmen den Belastungsmotor so anzusteuern, dass der Drehzahlverlauf des Prüfstandes dem eines realen Fahrzeuges entspricht. Hierbei muss allerdings schon erwähnt werden, dass sich das Trägheitsmoment des Prüfstandes aus den beiden Motoren und der Welle zusammensetzt und demnach größtmäßig deutlich geringer ist, als das eines beispielsweise 300 kg schweren Fahrzeuges.

Das Simulationsmodell muss daher in erster Linie zwei prinzipielle Hauptaufgaben erfüllen, eine Drehzahlauswertung sowie die darauf aufbauende Drehzahlveränderung. Die Realisierung und Überprüfung des Modells soll unter Verwendung der Simulationssoftware *Portunus* erfolgen. Des Weiteren ist die Einwirkung von realistisch möglichen Störgrößen auszuwerten. Dazu zählen in erster Linie alle Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, da auf jede neue Drehmomentenänderung des Antriebsstranges der Wert des Belastungsmotors angepasst werden muss. Dies kann allerdings nicht sprunghaft geschehen, da der Wert einer jeden Änderung zuvor im Simulationsmodell durch die Phase der Drehzahlauswertung ermittelt werden muss und erst danach den Belastungsmotor regelungstechnisch mit einem neuen Wert ansteuern kann.

Weitere Aufgabenstellungen sind die Umsetzung der Bewegungsgleichung

$$M_{dyn} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit dem Simulationsprogramm *Portunus* sowie die Umrechnung der translatorisch bewegten Fahrzeugmasse in eine rotierende Massenträgheit (Gl. 2.2).

$$J_{Fzg} = m_{Fzg} \cdot r_{Rad}^2 \quad (\text{Gl. 2.2})$$

3 Vorstellung des Simulationsprogrammes Portunus

Portunus ist ein Simulationsprogramm der *Adapted Solutions GmbH*, welches in sehr vielen Einsatzbereichen, mit durchaus unterschiedlichen Schwerpunkten und Aufgaben, verwendet werden kann. Dies kann mitunter die Abbildung von Antriebssystemen oder von Regelstrukturen sein, aber auch die Simulation von elektrischen sowie thermischen Komponenten oder ganzen Netzwerken ist grundsätzlich möglich (vgl. [2]). Die Systeme können daher auf ganz individueller Art grafisch beschrieben werden. Es sind Blockdiagramme, Zustandsgraphen und Netzwerke verwendbar (vgl. [2]). Bei sehr großen und umfangreichen Simulationen / Modellen ist der Einsatz von diversen Sub-Sheets denkbar, was im Grunde zu einer Erweiterung von der ursprünglichen Modelldatei führt. Damit kann eine übersichtliche Modellstruktur erzeugt werden und eine Abgrenzung von Modellabschnitten ist prinzipiell realisierbar. Weiterhin unterstützt *Portunus* internationale Standards, wie VHDL-AMS und SPICE und macht damit einen Modellaustausch mit anderen Simulationsprogrammen möglich (vgl. [2]). Des Weiteren können die Berechnungsergebnisse jederzeit direkt an die Programme *Excel*®, *Origin*® oder auch an *Matlab*® zu Auswertungszwecken übermittelt werden (vgl. [3]). Zusätzlich sind weitere Schnittstellen vorhanden, wie beispielsweise eine *Motor-CAD*® Importschnittstelle (vgl. [2]). Das Programm selbst ist mit vier Analysearten ausgestattet - der Analyse im Zeitbereich, der Analyse im Frequenzbereich, einer Arbeitspunktanalyse und einer Analyse des eingeschwungenen Zustandes (vgl. [2]). Für die vorliegende Arbeit ist lediglich die Zeitanalyse (Transiente-Analyse) von Bedeutung. *Portunus* kann außerdem eine umfangreiche Auswahl von verschiedenen Bibliotheken vorweisen (siehe Abbildung 3), mit deren Hilfe die oben genannten Aufgaben umgesetzt werden können (vgl. [2]).

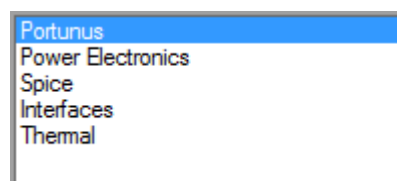


Abbildung 3: Bibliotheken von Portunus

Portunus besitzt eine übersichtlich angeordnete grafische Oberflächengestaltung (siehe Abbildung 4) und bietet für viele Funktionen eine Schaltfläche für einen schnellen Zugriff an. Die Einbindung von Modellobjekten ist wiederum schnell sowie einfach zu bewerkstelligen und geschieht per *Drag and Drop*.

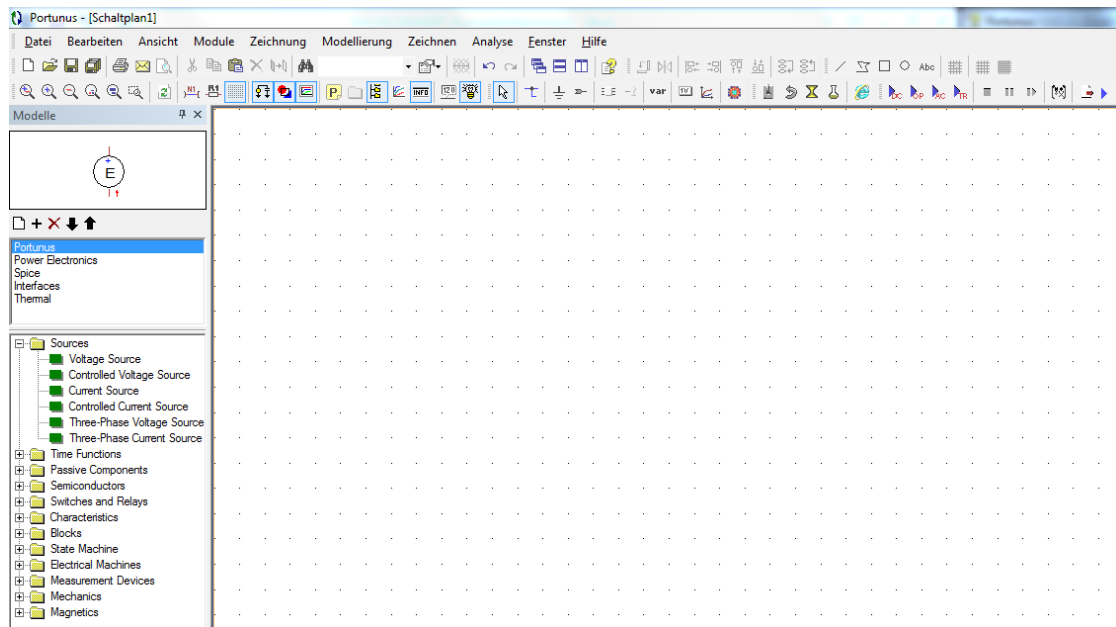


Abbildung 4: grafische Oberfläche von Portunus

Darüber hinaus kann man eine Variablendeklaration vornehmen, was zur variablen Einstellung der Trägheitsmomente in den Simulationsmodellen Verwendung gefunden hat. Es sei hier angemerkt, dass deckungsgleiche oder sehr nah beieinanderliegende Verläufe in dieser Arbeit mit *Portunus* auf die in Abbildung 5 dargestellte Weise veranschaulicht werden. So deckt der untere Verlauf immer dann den Oberen ab, wenn diese größenmäßig ähnlich oder gleich sind.

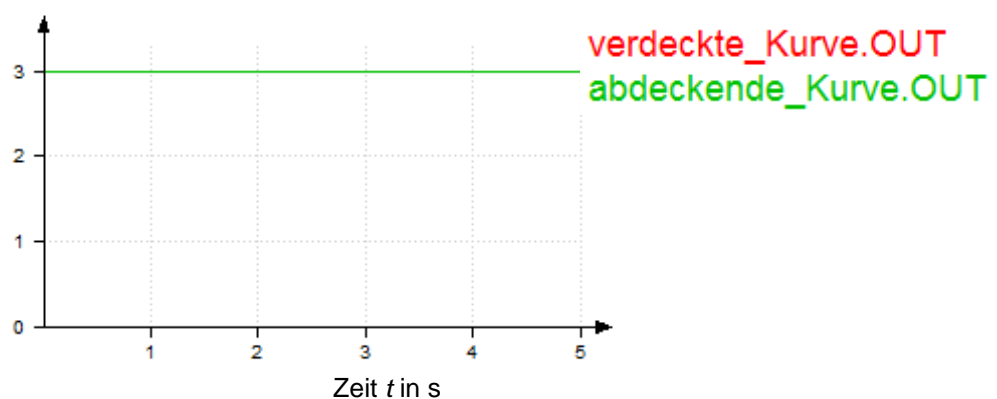


Abbildung 5: Darstellung von Verläufen

4 Umsetzung der Bewegungsgleichung mit Portunus

4.1 Umrechnung des Drehmomentes in eine Drehzahl

Da in *Portunus* diese Berechnung mittels Übertragungsfunktion $G(s)$ erfolgen wird, ist eine vorherige Umrechnung von der Differenzialgleichung (2.1) mit den Laplace-Vorschriften von Nöten. Damit ergibt sich die Gleichung

$$M_{dyn} = J \cdot \omega \cdot s \quad ; s = \text{Laplace-Operator} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Nun wird diese Gleichung nach ω umgestellt und bildet die Gleichung

$$\omega = M_{dyn} \cdot \frac{1}{J \cdot s} \quad ; s = \text{Laplace-Operator} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Diese Gleichung kann jetzt mit den Modellobjekten *Source* und $G(s)$ umgesetzt werden (siehe Abbildung 6), wobei das Objekt $G(s)$ einem I-Glied entspricht.

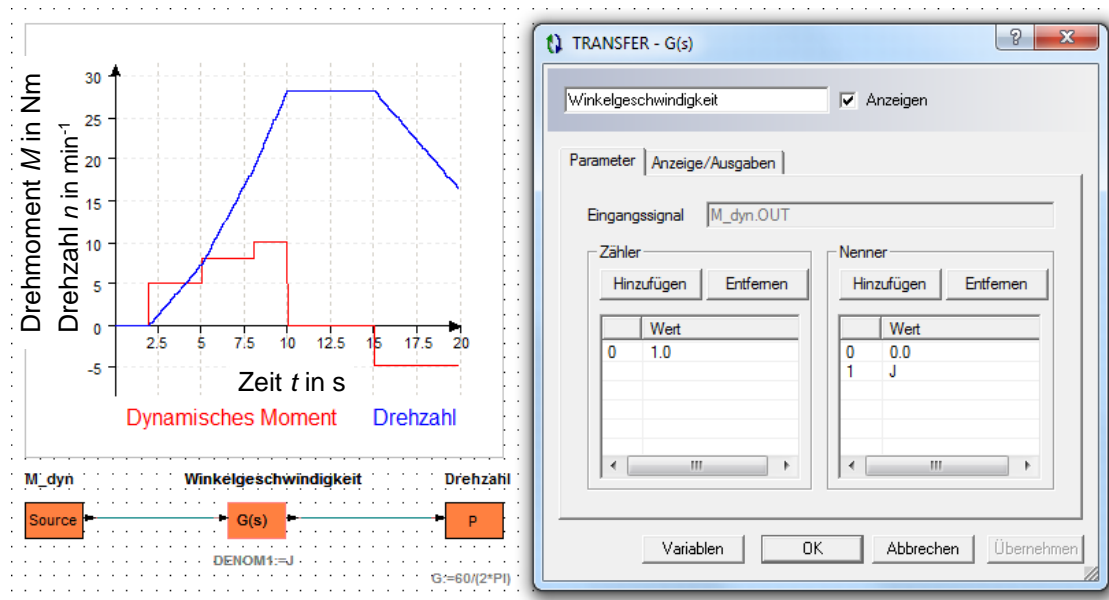


Abbildung 6: Umrechnung des Drehmomentes in eine Drehzahl

Jedoch ist der Ausgabewert des Modellobjektes $G(s)$ eine Winkelgeschwindigkeit und muss deshalb mit Hilfe eines entsprechenden Faktors umgerechnet werden. Diese Umrechnung wird durch das Modellobjekt *P* erreicht (Abbild. 6).

Umrechnungsfaktor:

$$\frac{\frac{\omega}{s^{-1}}}{\frac{n}{\text{min}^{-1}}} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad ; [n] = \text{min}^{-1}, [\omega] = s^{-1}, s = \text{Sekunde} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

4.2 Umrechnung einer Drehzahl in ein Drehmoment

Auch diese Berechnung wird in *Portunus* unter Verwendung einer Übertragungsfunktion umgesetzt und basiert wiederum auf der Differentialgleichung (2.1). Durch das Anwenden der Laplace-Vorschriften wird die Gleichung (4.1) erneut gebildet und muss diesmal keiner Umstellung unterzogen werden. Somit ist die Umsetzung mit den jeweiligen Modellobjekten *Source*, *P* und *G(s)* sofort möglich, wobei das Modellobjekt *P* jetzt die Umrechnung von Drehzahl zu Winkelgeschwindigkeit vornimmt (siehe Abbildung 7).

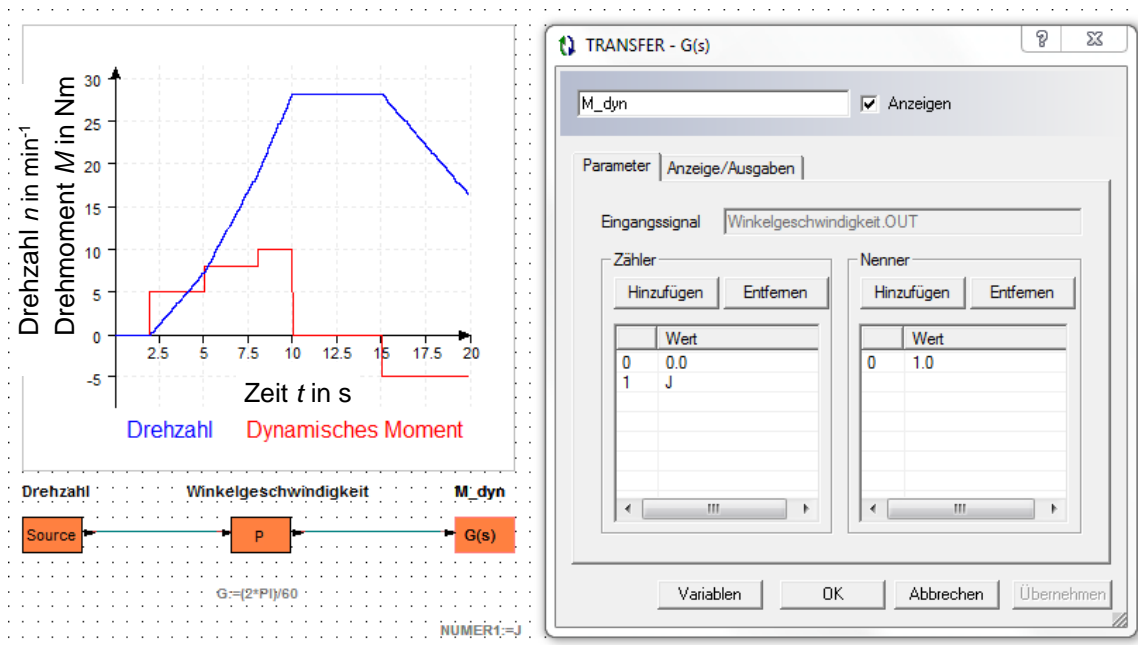


Abbildung 7: Umrechnung einer Drehzahl in ein Drehmoment

Hat das Modellobjekt *G(s)* im Punkt 4.1 mit seiner Übertragungsfunktion noch ein regelungstechnisches I-Glied gebildet, so ist in diesem Fall ein regelungstechnisches D-Glied entstanden und realisiert damit eine Rückrechnungsmöglichkeit / Umkehroperation für den vorherigen Punkt.

5 Herleitung des theoretischen Bremsmomentes

Um das notwendige Bremsmoment ermitteln zu können sind diverse Fahrzeugdaten, wie z.B. Fahrzeugmasse, Radradius und das Trägheitsmoment der Prüfstandsmotoren, nötig. Somit kann zum Einen das Fahrzeugträgheitsmoment unter Verwendung der Gleichung (2.2) berechnet und später ins Simulationsmodell implementiert werden. Demnach hätte ein 300 kg schweres Rennfahrzeug mit einem Radradius von 0,25 m ein, auf einen Massepunkt bezogenes, Trägheitsmoment von 18,75 kgm². Dieses Trägheitsmoment muss allerdings noch auf die Welle umgerechnet werden, was prinzipiell über die Gleichung

$$J_{Fzg_Welle} = J_{Fzg} \cdot \left(\frac{\omega_{Rad}}{\omega_{Welle}} \right)^2 \quad (\text{Gl. 5.1})$$

erfolgt. Da die Antriebsart des Motorenprüfstandes einen Direktantrieb darstellt, kann diese Gleichung stark vereinfacht werden. Es gilt daher $\omega_{Rad} = \omega_{Welle}$ und Gleichung 5.1 vereinfacht sich zu

$$J_{Fzg_Welle} = J_{Fzg} \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Für die weitere Bestimmung des Bremsmomentes ist es erforderlich das Fahrzeugträgheitsmoment und das Trägheitsmoment der Prüfstandsmotoren in Verbindung zu bringen. Dies erfolgt unter der Verwendung von Gleichung

$$M_{dyn_Fzg} = J_{Fzg} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

und Gleichung

$$M_{dyn_Motoren} = J_{Motoren} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{Gl. 5.4})$$

Mit dem übergeordneten Ziel einen identischen Drehzahlverlauf zu erreichen, werden nun beide Gleichungen nach $\frac{d\omega}{dt}$ umgestellt und anschließend gleichgesetzt. Die Anwendung dieser Rechenschritte führt zur Gleichung (5.5).

$$\frac{M_{dyn_Fzg}}{J_{Fzg}} = \frac{M_{dyn_Motoren}}{J_{Motoren}} \quad (\text{Gl. 5.5})$$

Durch eine Umformung von Gleichung (5.5) erhält man nun

$$\frac{M_{dyn_Fzg}}{M_{dyn_Motoren}} = \frac{J_{Fzg}}{J_{Motoren}} \quad (\text{Gl. 5.6})$$

Die damit entstandene Gleichung bildet die grundlegende Basis für die Umsetzung im Simulationsmodell und lässt einen wichtigen Sachverhalt erkennen: Um einen identischen Drehzahlverlauf erreichen zu können, ist es notwendig, dass das Verhältnis der dynamischen Momente gleich dem Verhältnis der Trägheitsmomente ist.

Im letzten Schritt wird die Drehmomentengleichung des realen Fahrzeugantriebsmotors

$$M_{i_reales_Fzg} = M_{dyn_Fzg} \quad (\text{Gl. 5.7})$$

mit der des Prüfstandantriebsmotors

$$M_{i_Prüfstand} = M_{dyn_Motoren} + M_{Trägheit} \quad (\text{Gl. 5.8})$$

in Zusammenhang gebracht. Jede Art von Reibungsverlusten wird dabei vernachlässigt. Der Zusammenhang selbst ergibt sich durch das Gleichsetzen von Gleichung (5.7) und Gleichung (5.8) und ist deshalb möglich, weil die Drehmomentenvorgabeeinrichtung beider Antriebe die Gleiche ist (Gas- und Bremspedal).

$$M_{dyn_Fzg} = M_{dyn_Motoren} + M_{Trägheit} \quad (\text{Gl. 5.9})$$

Durch Subtraktion von $M_{dyn_Motoren}$ auf die andere Seite entsteht erstmals eine Gleichung mit der das Bremsmoment des Belastungsmotors berechnet werden kann.

$$M_{Trägheit} = M_{dyn_Fzg} - M_{dyn_Motoren} \quad (\text{Gl. 5.10})$$

Allerdings hat diese Gleichung noch keinen Bezug zu den realen Fahrzeugdaten und muss deshalb noch weiter umgeformt werden. So ist als Erstes eine beidseitige Division mit M_{dyn_Fzg} vorzunehmen.

$$\frac{M_{Trägheit}}{M_{dyn_Fzg}} = \frac{M_{dyn_Fzg}}{M_{dyn_Fzg}} - \frac{M_{dyn_Motoren}}{M_{dyn_Fzg}} \quad (\text{Gl. 5.11})$$

Danach wird die Gleichung (5.6) auf die Gleichung (5.11) angewendet und wo es möglich ist, wird gekürzt.

$$\frac{M_{Trägheit}}{M_{dyn_Fzg}} = 1 - \frac{J_{Motoren}}{J_{Fzg}} \quad (\text{Gl. 5.12})$$

Als letztes wird M_{dyn_Fzg} auf die andere Seite gebracht und damit die Endgleichung der Herleitung des theoretischen Bremsmomentes gebildet.

$$M_{Trägheit} = \left(1 - \frac{J_{Motoren}}{J_{Fzg}}\right) \cdot M_{dyn_Fzg} \quad (\text{Gl. 5.13})$$

Es sei hier angemerkt, dass der Faktor M_{dyn_Fzg} nach der Gleichung (5.7) dem inneren Drehmoment des Antriebsmotors entspricht und demnach auch den Drehmomentenvorgabewert, welcher von den Pedalen (Gas- und Bremspedal) kommt, für das System repräsentiert.

$$M_{Trägheit} = \left(1 - \frac{J_{Motoren}}{J_{Fzg}}\right) \cdot M_{Systemvorgabe} \quad (\text{Gl. 5.14})$$

6 Modellentwicklung mit Portunus

6.1 Stufe 1

Die Entwicklung des Simulationsmodells für den Motorenprüfstand erfolgt stufenweise, wobei mit dem Modell der Stufe 1 die Umsetzung der Gleichung (5.14), welche durch die Herleitung des theoretischen Bremsmomentes gebildet wurde, erreicht werden soll.

6.1.1 Abschnitte der Stufe 1

Die Simulationsdatei der Stufe 1 setzt sich aus den vier Hauptabschnitten zusammen, die da wären „realer Aufbau“, „Ermittlung des Trägheitswertes“, dem „Vergleichsmodell“ und der „Drehmomentenvorgabe“. Eine komplette Darstellung von der Simulationsdatei ist der Arbeit als Anlage 1 beigelegt.

Der Abschnitt „Drehmomentenvorgabe“ wird durch eine Zeitfunktion gebildet (siehe Abbildung 8) und repräsentiert den vorgegebenen Verlauf des geforderten Drehmomentes - gewissermaßen ein Abbild von Gas- und Bremspedal.

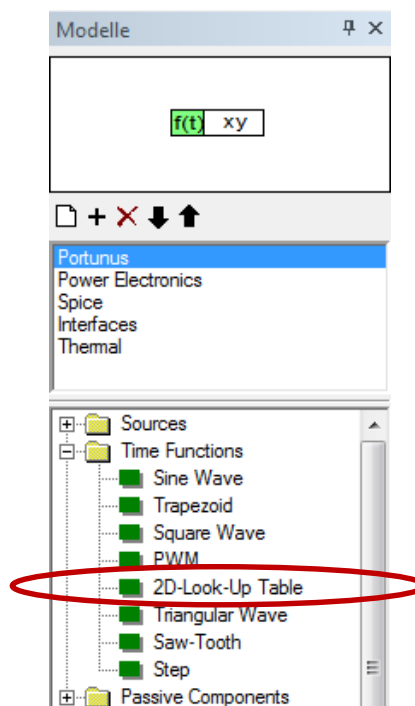


Abbildung 8: Modellobjekt 2D Zeitfunktion

Die Erstellung des Verlaufes wird durch die Vergabe von Wertepaaren erreicht. Mittels Anwendung von linearer Interpolation sind Block- und lineare Verläufe eingestellt worden (siehe Abbildung 9).

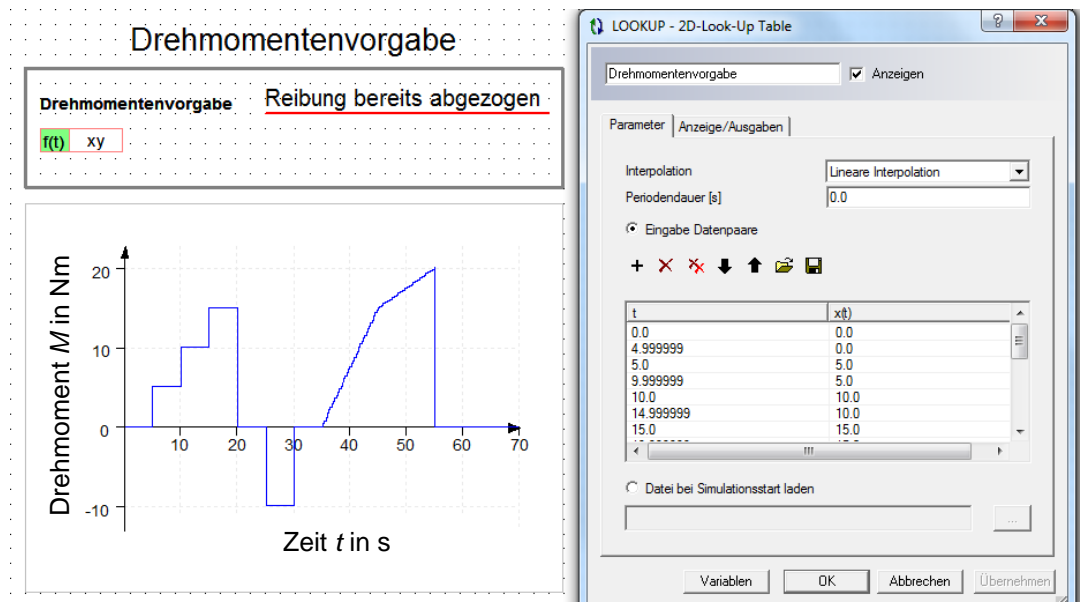


Abbildung 9: Erstellung eines Drehmomentenverlaufes

Das „Vergleichsmodell“ hingegen ist der Abschnitt von der Simulationsdatei, mit dem eine Überprüfung des Drehzahlverlaufes durchgeführt wird. Hierfür wird ein fiktives Fahrzeugträgheitsmoment zu Grunde gelegt und die Realisierung erfolgt mit den Modellobjekten *Torque Source* und *Body Rotating* (siehe Abbildung 10). Dem Objekt *Torque Source* (*Antriebsmotor2*) ist dabei der Drehmomentenverlauf aus Abbildung 9 zugeordnet worden und das Objekt *Body Rotating* (*Trägheit_Fzg*) wurde mit dem erdachten Fahrzeugträgheitsmoment versehen. Weiterhin ist für eine spätere Darstellung von Ist- und Söldrehzahl, das Modellobjekt *Source* (*N_soll*) eingefügt worden.

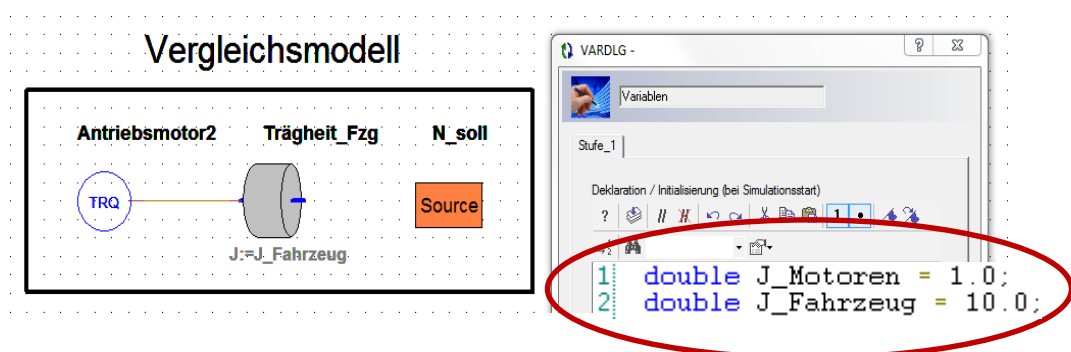


Abbildung 10: Realisierung des Abschnittes „Vergleichsmodell“

Der dritte Abschnitt „realer Aufbau“ spiegelt die Realität in groben Zügen wieder. So werden Antriebsmotor, Belastungsmotor (beide plus Inverter) und Welle modellmäßig abgebildet (Abbildung 11). Die hier simulierte Istdrehzahl (N_{ist}) entspricht der sich real ergebenden Drehzahl an der Welle des Prüfstandes.

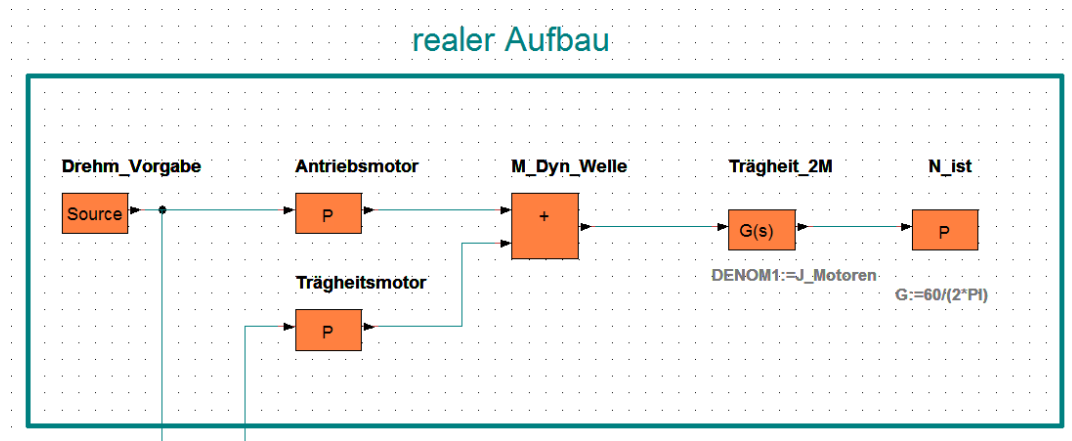


Abbildung 11: Modellierung Antriebsmotor, Belastungsmotor (*Trägheitsmotor*) und Welle

Dem Objekt *Source* (*Drehm_Vorgabe*) ist dabei wiederum der Drehmomentenverlauf aus Abbildung 9 zugeordnet worden, während die beiden Motoren jeweils durch ein *P* Modellobjekt mit dem Faktor 1.0 dargestellt werden. Dies hat lediglich die Bewandtnis, eine optisch schönere Modelldarstellung zu erreichen, ohne dass diverse Werte verändert werden (siehe Abbildung 12).

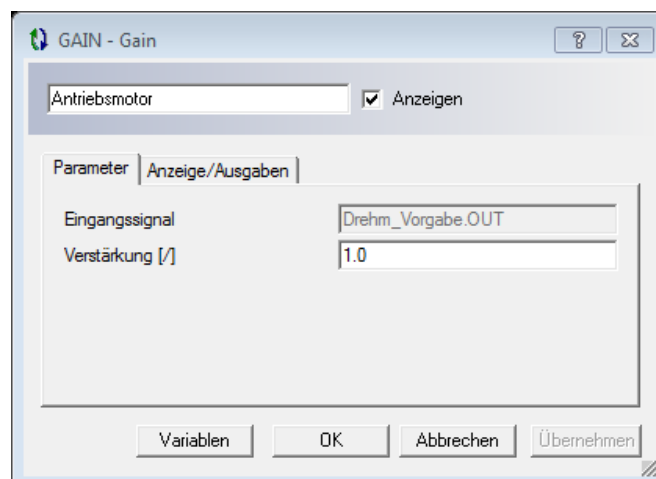


Abbildung 12: Motorenmodellierung

Die Bildung des resultierenden dynamischen Momentes an der Welle wird durch eine Summationsstelle *Sum* (*M_Dyn_Welle*) modelliert und danach auf

die im Punkt 4.1 ermittelte Übertragungsfunktion $G(s)$ (*Trägheit_2M*) gegeben (siehe Abbildung 13) und anschließend mittels Umrechnungsfaktor, der sich im rechten P Modellobjekt (*N_ist*) befindet, in eine Drehzahl umgewandelt (Istdrehzahl). Jedoch ist das hier eingesetzte Trägheitsmoment der Prüfstandsmotoren noch ein fiktiver Wert (siehe Abbildung 10), der eine einfache Überprüfung der Gleichung (5.6) ermöglichen soll.

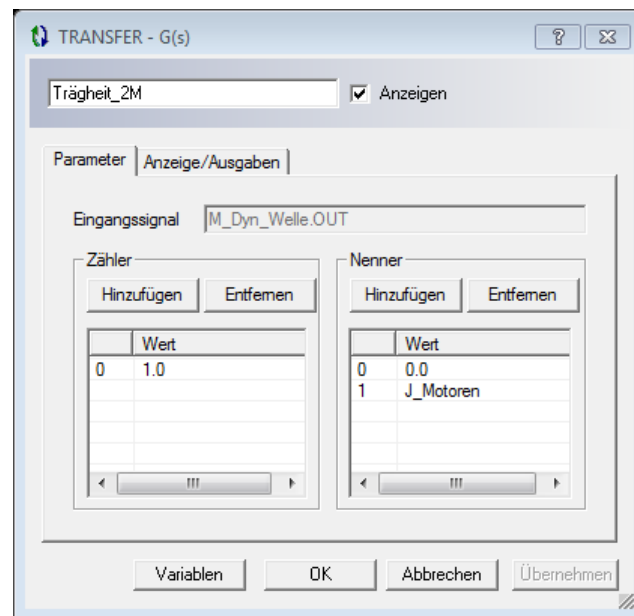


Abbildung 13: Verwendung der Übertragungsfunktion aus 4.1

Im letzten der vier Abschnitte wird nun die Gleichung (5.14) angewendet, um das notwendige Bremsmoment berechnen zu können (siehe Abbildung 14).

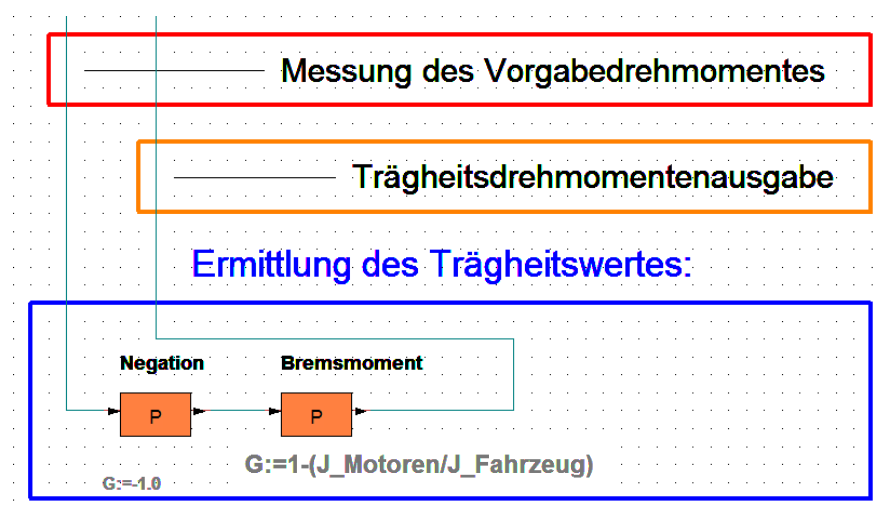


Abbildung 14: Anwendung der Gleichung (5.14)

6.1.2 Betrachtung der Simulationsergebnisse von Stufe 1

Das Ergebnis dieser Simulationsdatei ist ein identischer Drehzahlverlauf (siehe Abbildung 15) von Prüfstand (Istdrehzahl) und Vergleichsmodell (Solldrehzahl).

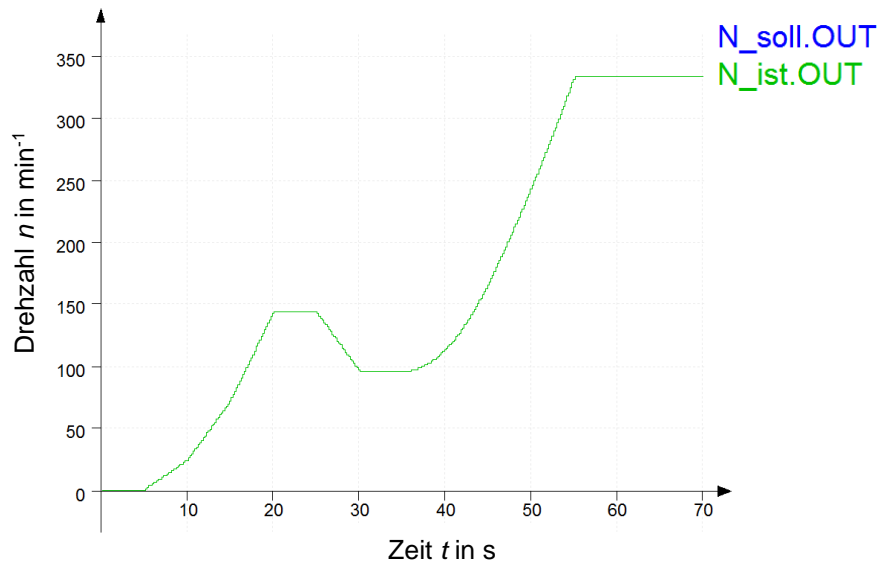


Abbildung 15: Vergleich der Drehzahlverläufe

Weiterhin wurde für eine Überprüfung der Gleichung (5.6) ein Verhältnis von 10:1 über die fiktiven Werte der Trägheitsmomente eingestellt und ergab eine Bestätigung dieser Gleichung (siehe Abbildung 16). Somit kann festgehalten werden, dass sich ein identischer Drehzahlverlauf einstellt, wenn das Verhältnis der dynamischen Momente gleich dem Verhältnis der Trägheitsmomente ist.

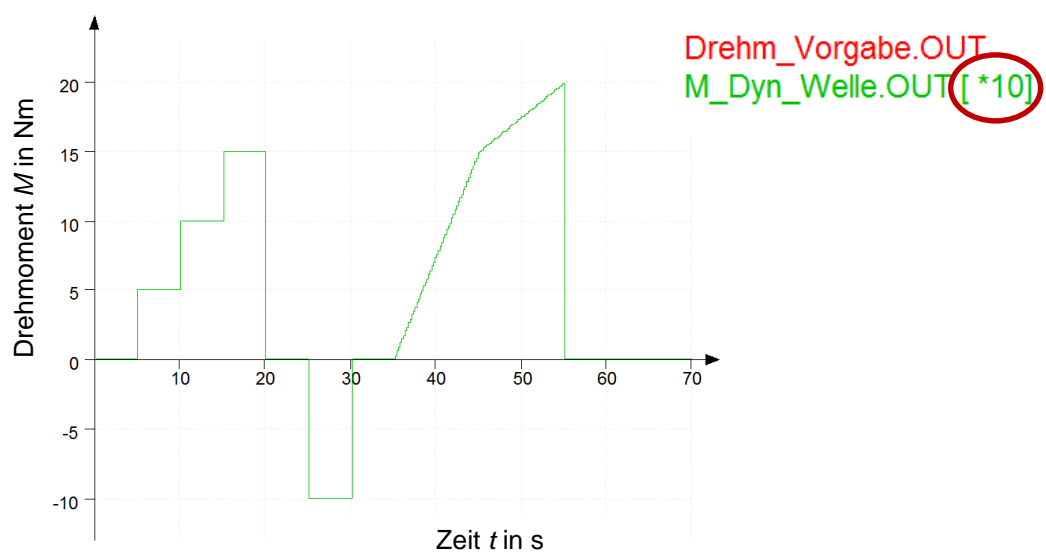


Abbildung 16: Bestätigung der Gleichung (5.6)

Jedoch wurde die Auswertung des Drehzahlanstieges in dieser Datei noch nicht mit umgesetzt und eine mögliche Ungenauigkeit der Motoren würde die Drehzahl dauerhaft verfälschen. Somit ist eine Erweiterung nötig.

6.2 Stufe 2

Die Simulationsdatei der Stufe 2 dient der Einführung einer Regelung, welche das Bremsmoment berechnet und an den Trägheitsmotor übergibt. Damit findet die Gleichung (5.14) in dieser Simulationsdatei keine Anwendung mehr. Allerdings behält die Gleichung (5.6) weiterhin ihre Gültigkeit. Zu deren Überprüfung werden die fiktiven Werte der Trägheitsmomente aus Abbildung 10 weiter verwendet. Die eingesetzte Regelungsvariante ist eine PI-Regelung, da aufgrund des Verhaltens des I-Glieds eine Störgrößenbeseitigung realisierbar ist. Ein reiner I-Regler findet wegen seiner geringen Regelgeschwindigkeit keine Anwendung. Der P-Anteil des P-Glieds soll daher eine gewisse Dynamik einbringen.

6.2.1 Abschnitte der Stufe 2

Die Simulationsdatei der Stufe 2 besteht aus den drei Abschnitten „realer Aufbau“, „Vergleichsmodell“ und der „Drehmomentenvorgabe“, die schon in Stufe 1 verwendet worden sind. Des Weiteren sind nun die Abschnitte „Regelung“ und „Referenzwertbildung“ vorhanden. Eine Gesamtansicht dieser Datei ist der Arbeit als Anlage 2 beigelegt.

Der Abschnitt „Drehmomentenvorgabe“ stimmt mit dem aus 6.1.1 bekannten Abschnitt überein und ist eine komplett identische Kopie dessen. Beim Abschnitt „Vergleichsmodell“ hingegen wurden diverse Namensänderungen von Modellobjekten durchgeführt, um eine bessere Darstellung des späteren Drehzahlvergleiches zu gewährleisten. Im Abschnitt „realer Aufbau“ erfolgte eine kleine modellmäßige Änderung, so ist nun durch das Modellobjekt *Sourse* dem Antriebsmotor direkt der Drehmomentenverlauf aus Abbildung 9 zugeordnet worden. Weiterhin wurde eine mögliche Störgröße, die Drehmomentenungenauigkeit des Belastungsmotors, ergänzt (siehe Abbildung 17).

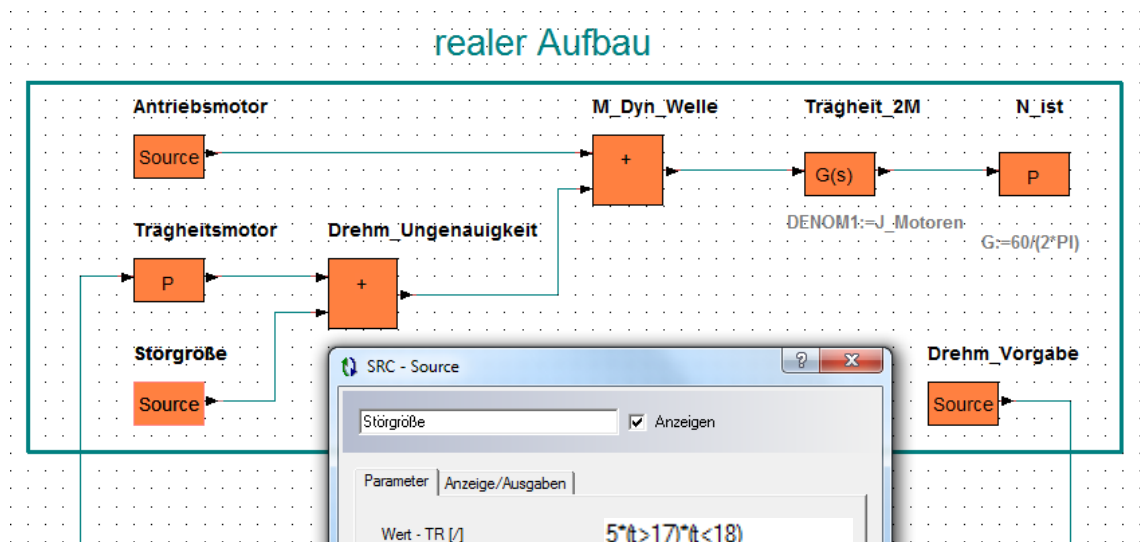


Abbildung 17: Änderung im Abschnitt „realer Aufbau“

Durch den Abschnitt „Referenzwertbildung“ wird der Drehzahlsollwert (N_{soll}) für die Regelung gebildet. Dies geschieht auf ähnliche Weise wie die Bildung des Vergleichsdrehzahlsollwertes (N_{soll2}) im „Vergleichsmodell“. Hierfür finden die Übertragungsfunktion mit dem erdachten Fahrzeugträgheitsmoment und der Umrechnungsfaktor aus 4.1 erneut ihre Anwendung (Abbildung 18).

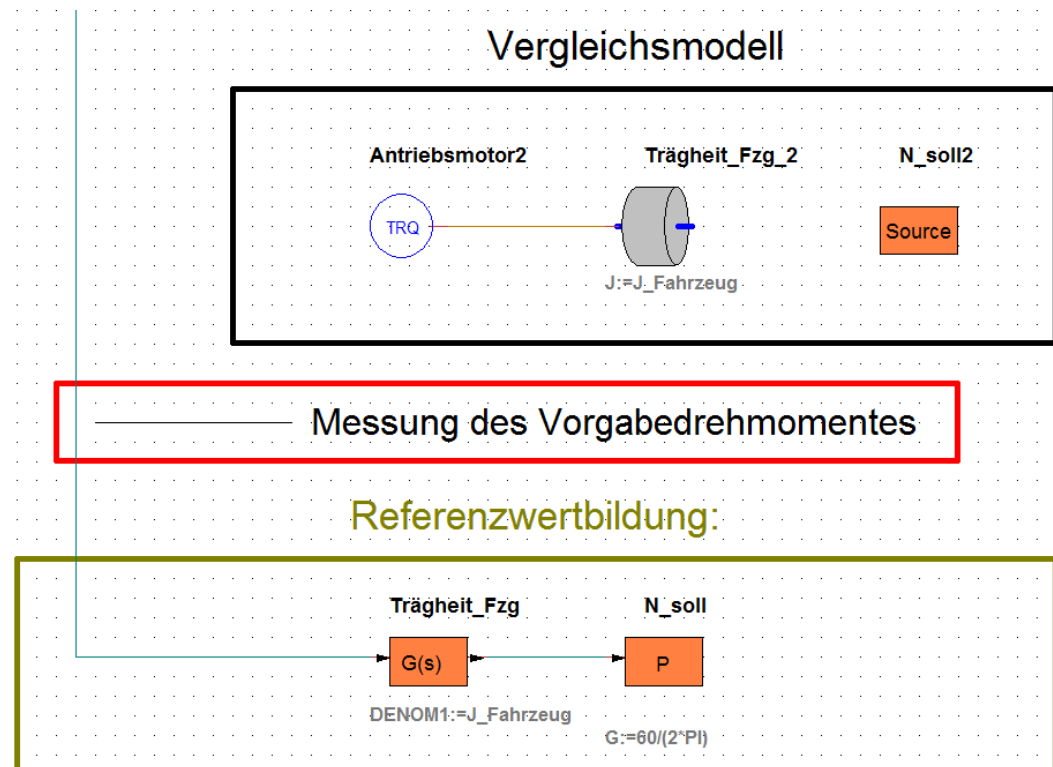


Abbildung 18: Bildung des Drehzahlsollwertes

Im fünften Abschnitt der Simulationsdatei der Stufe 2 wird die Regelung realisiert. Diesem Abschnitt namens „Regelung“ wird der Drehzahlsollwert aus der „Referenzwertbildung“ und der Drehzahlwert aus dem Abschnitt „realer Aufbau“, durch die beiden Modellobjekte *Source*, übergeben. Wobei der Drehzahlwert eine real zumessende Größe wäre. Die übrigen Objekte bilden eine klassische PI-Regelung (siehe Abbildung 19 und 20), bestehend aus der Regeldifferenz e , der Stellgröße / Reglerausgangsgröße y (im Modell mit u bezeichnet), einer Negationsstelle und den P- und I-Gliedern (vgl. [4] S. 131).

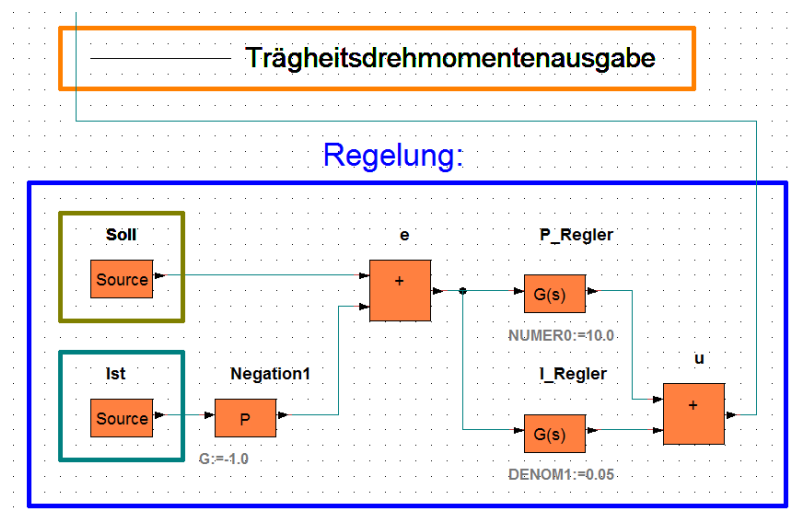
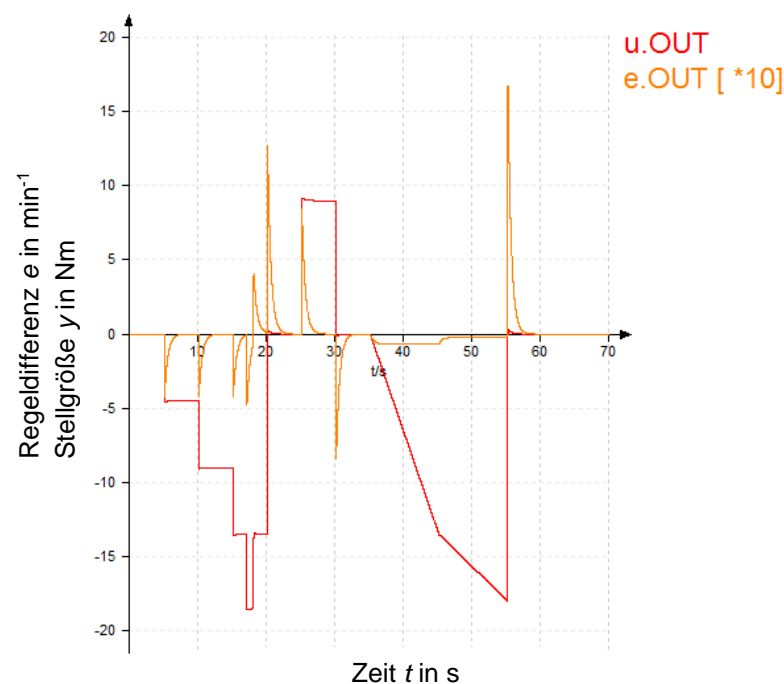


Abbildung 19: Abschnitt „Regelung“

Abbildung 20: Regeldifferenz e und Stellgröße $y(u)$

6.2.2 Betrachtung der Simulationsergebnisse von Stufe 2

Betrachtet man nun die Simulationsergebnisse, kann man feststellen, dass die Drehzahlverläufe von Drehzahlwert (N_{ist}), Drehzahlsollwert (N_{soll}) und Vergleichsdrehzahlsollwert (N_{soll2}) in einer guten Näherung übereinstimmen (siehe Abbildung 21). Jedoch erst mit einer genaueren Ansicht kann man die Unterschiede erkennen, so ist bei der Zeit 17 s ein Anstieg des Drehzahlwertes ersichtlich. Dieser Anstieg tritt deshalb auf, weil ab diesem Zeitpunkt die eingestellte Störgröße zu wirken beginnt. Dieser Einfluss wird allerdings durch die Regelung wieder ausgeglichen. Ein weiterer Unterschied wird bei einer Zeit von 55 s erkennbar, wo der Drehmomentenverlauf (Abbildung 9) schlagartig auf null zurückgeht. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Regelung nicht sofort den passenden Wert einstellen kann und etwas Zeit zum ab Integrieren braucht. Somit erfolgt im ersten Moment, aufgrund des negativen Regelungsausgabewertes, eine Drehzahlreduzierung und danach eine erneute Heranführung an den Sollwert. Diese Gegebenheit des Drehzahlunterschiedes ist prinzipiell kein Einzelfall und geschieht bei jeder sprunghaften Drehmomentenänderung. Bei einer Drehmomentenvergrößerung ist eine Drehzahlsteigerung

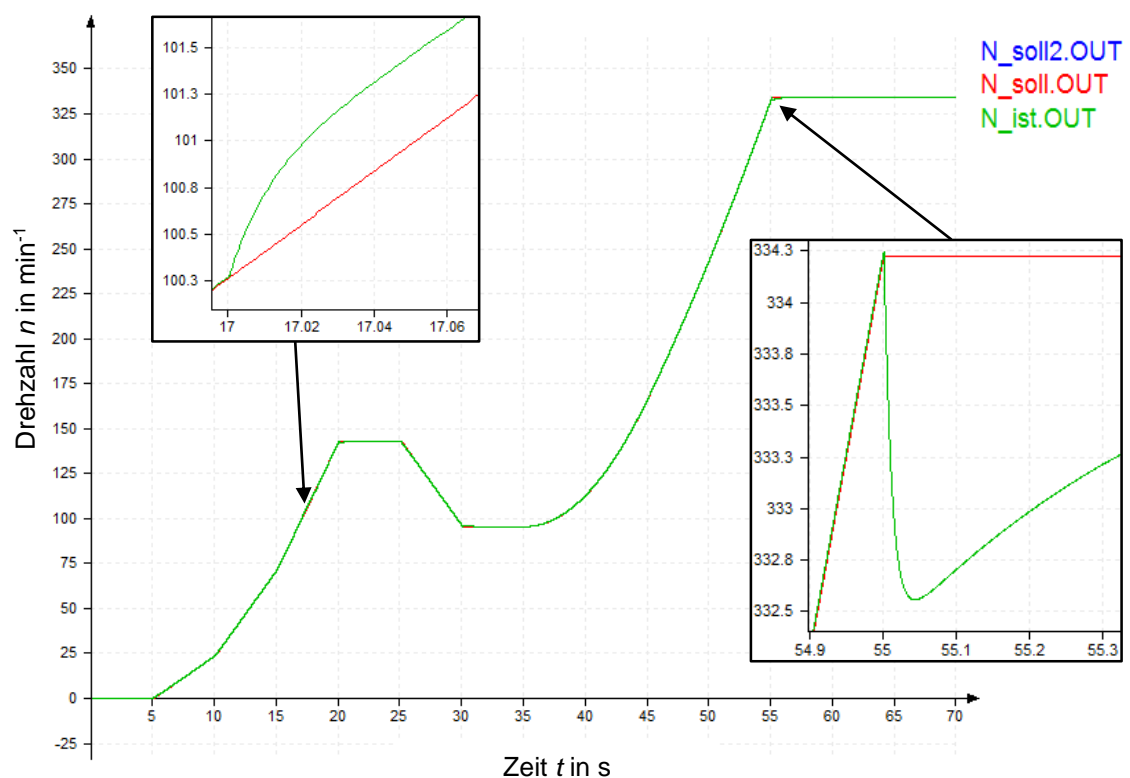


Abbildung 21: Drehzahlvergleich

die Folge, wie es mit der Störgröße nachgewiesen wird. Des Weiteren wird durch die Darstellung der Drehzahlverläufe das Wirken von blockförmigen und linearen Drehmomentenvorgaben übersichtlich zum Ausdruck gebracht.

Was die Überprüfung von Gleichung (5.6) angeht, so kann geschlussfolgert werden, dass sich auch bei der Verwendung einer Regelung das notwendige Verhältnis einstellen lässt - allerdings nicht unmittelbar (siehe Abbildung 22).

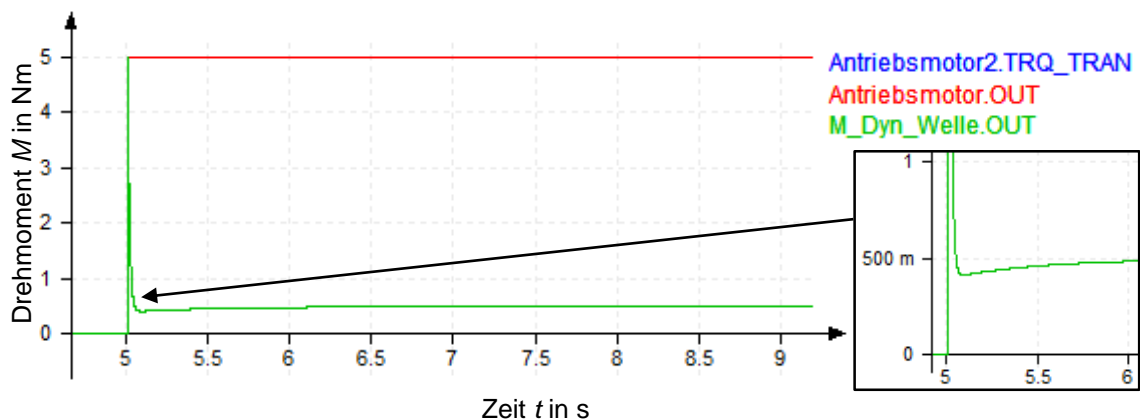


Abbildung 22: Überprüfung von Gleichung (5.6)

6.3 Stufe 3

Während die Simulationsdateien der Stufe 1 und Stufe 2 mit dem ursprünglichen Drehmomentenverlauf arbeiten, wird mit der Simulationsdatei der Stufe 3 nun der vorgegebene Drehmomentenverlauf direkt aus dem Drehzahlgradienten rekonstruiert. Hierfür soll der jeweilige Drehzahlverlauf, welcher sich direkt an der Welle des Prüfstandes einstellt, gemessen werden. Im Gegensatz zur Stufe 2 wird diese gemessene Größe nicht mehr nur als Rückführgröße (*Ist*) für die Regelung verwendet, sondern auch zu diesem Zweck genutzt (Drehmomentenrekonstruktion). Deshalb wird als Erstes die Drehzahlmessung modelliert. Danach erfolgt auf der Grundlage dieser Messung eine Umrechnung mit den unter Punkt 4 beschriebenen Methoden, um die Führungsgröße (*Soll*) für die Regelung zu bestimmen. Mit deren Hilfe wird dann der Belastungsmotor angesteuert und das sich ergebende dynamische Moment an der Welle nimmt die Drehzahlveränderung vor.

6.3.1 Abschnitte der Stufe 3

Die Simulationsdatei der Stufe 3 besteht aus fünf Abschnitten. Die Abschnitte „Drehmomentenvorgabe“, „Vergleichsmodell“ und „Regelung“ sind komplett identisch mit denen der Stufe 2. Beim Abschnitt „realer Aufbau“ wurde die Störgröße entfernt. Der Teil „Referenzwertbildung“ wurde stark erweitert und realisiert die notwendige Drehmomentenrekonstruktion. Dieser und alle anderen Abschnitte der Datei werden durch Anlage 3 nochmals zusammenhängend dargestellt, wobei die Referenzwertbildung nun etwas näher beschrieben wird.

Wie bereits im Vorfeld erwähnt, findet als Erstes eine Drehzahlmessung statt. Dies wird im Simulationsmodell als rot umrandete Signalleitung dargestellt. Das Signal wird dann an die Regelung und an die Referenzwertbildung übertragen (siehe Abbildung 23).

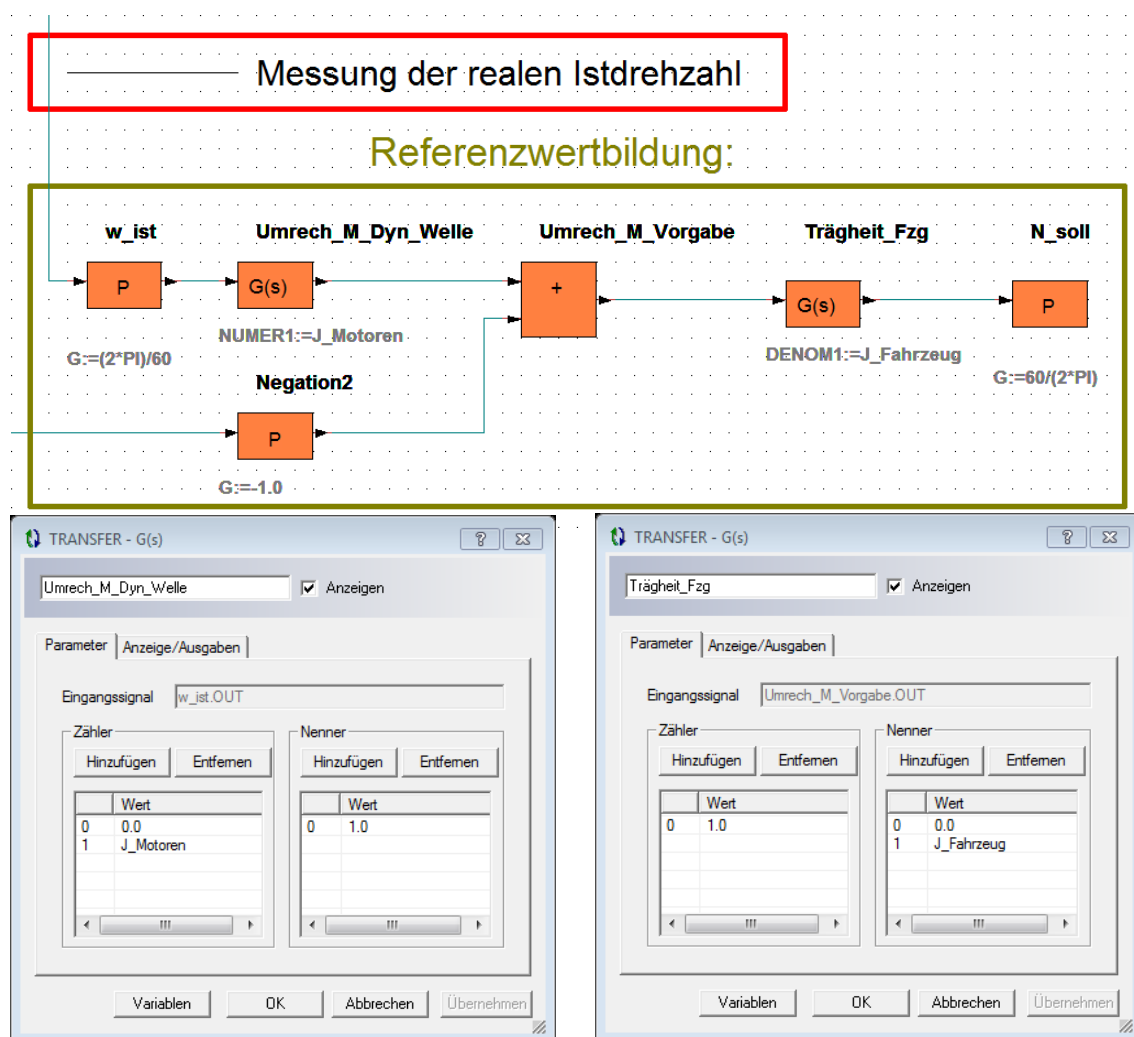


Abbildung 23: Erweiterung des Abschnittes „Referenzwertbildung“

Im Abschnitt „Referenzwertbildung“ wird das Drehzahlsignal mit dem P Modell-objekt w_{ist} in eine Winkelgeschwindigkeit umgerechnet, diese der aus 4.2 bekannten Übertragungsfunktion $G(s)$ ($Umrech_M_Dyn_Welle$) zugeführt und somit das wirkende dynamische Moment an der Welle ermittelt. Der Wert des dynamischen Momentes und das jeweilige Bremsmoment, dass durch die Regelung eine ständig bekannte Größe ist, werden durch das Modellobjekt Sum ($Umrech_M_Vorgabe$) vereint und rekonstruieren auf diese Weise die Drehmomentenvorgabe aus Abbildung 9 (siehe Abbildung 24). Das eingesetzte Modellobjekt P ($Negation2$) ändert dafür die Vorzeichenkonvektion des Regelungsausgabewertes, denn wenn im Abschnitt „realer Aufbau“ ein negativer Ausgabewert anliegt, so soll dieser hier im Abschnitt „Referenzwertbildung“ positiv werden. Weiterhin, wenn ein positiver Ausgabewert im Abschnitt „realer Aufbau“ anliegt soll dieser dann hier negativ werden. Mit dem damit erhaltenen Drehmoment und durch das Zurückgreifen auf die Übertragungsfunktion $G(s)$ ($Trägheit_Fzg$) aus 4.1, kann nun die Führungsgröße ($Soll$) für die Regelung berechnet werden. Dies vollzieht sich auf bekannte Weise mit dem Fahrzeugträgheitsmoment und einer anschließenden Umrechnung im P Modellobjekt (N_soll) von Winkelgeschwindigkeit zu Drehzahl (siehe Abbildung 23).

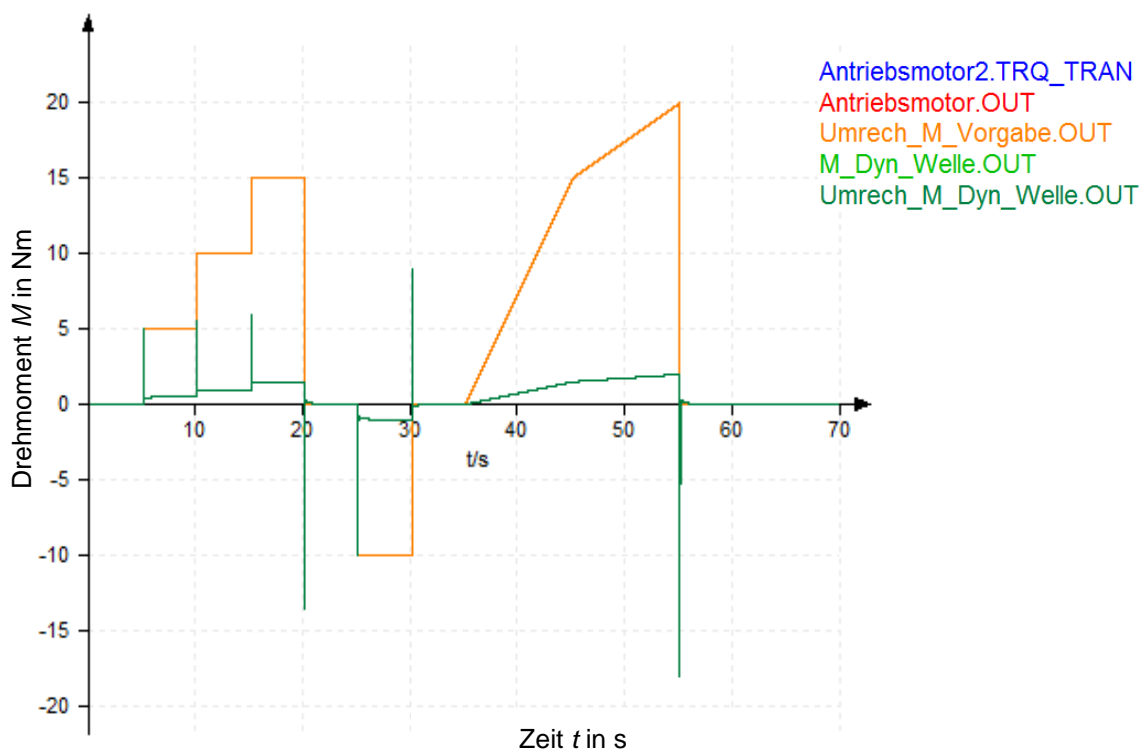


Abbildung 24: Drehmomentenrekonstruktion

6.3.2 Betrachtung der Simulationsergebnisse von Stufe 3

Auswertend kann festgestellt werden, dass sich der vorgegebene Drehmomentenverlauf und der Verlauf des dynamischen Momentes rekonstruieren lassen (siehe Abbildung 24). Weiterhin sind die Drehzahlverläufe nahezu identisch mit denen der Stufe 2, allerdings ohne den simulierten Störgrößeneinfluss. Die sprunghaften Drehmomentenänderungen (bremsen, beschleunigen) verursachen nach wie vor Drehzahlreduzierungen bzw. Drehzahlsteigerungen bei Sprungstellen, werden aber durch die Regelung beseitigt. Dies wird in der Abbildung 24 durch den Verlauf des dynamischen Momentes veranschaulicht. Das Ausregeln der Störgröße (Drehmomentenungenauigkeit des Belastungsmotors) kann jedoch hier nicht erfolgen, da sich diese über das dynamische Moment der Welle auf die Führungsgröße (*Soll*) auswirkt und nicht heraus gerechnet werden kann, weil deren absoluter Wert unbekannt ist. Eine Drehmomentenungenauigkeit des Antriebsmotors wäre in dieser Stufe unproblematisch, da die Ungenauigkeit mit erfasst und als gültiges Drehmoment von den Abschnitten „Vergleichsmodell“ und „Referenzwertbildung“ interpretiert werden würde. Somit stellt sich ein Gleichlauf beider Abschnitte auch bei einer Drehmomentenungenauigkeit des Antriebsmotors ein.

6.4 Stufe 4

Den Abschluss der Modellentwicklung bildet die Simulationsdatei der Stufe 4, mit der das Modell bestmöglich an die realen Gegebenheiten angepasst werden soll. Während in den vorangegangenen Stufen noch fiktive Werte für eine übersichtliche Darstellung verwendet wurden, so werden nun die realen Größen eingesetzt. Hierzu zählen das Trägheitsmoment der Prüfstandsmotoren aus [5] S.122 und das Fahrzeugträgheitsmoment des aus Punkt 5 bekannten 300 kg schweren Fahrzeuges (siehe Abbildung 25). Weiterhin soll durch den Einsatz von Verzögerungsgliedern das Gesamtverhalten des Simulationsmodells realistischer wirken. Allerdings sind die verwendeten Verzögerungskonstanten wiederum nur empirisch abgeschätzte Werte, da die Absoluten nicht zur Verfügung

stehen. Die abschließende Ergebnisberechnung erfolgt in dieser Stufe mit einer Schrittweite von 20 ms, was sich an eine spätere Umsetzung im Steuergerät orientiert.

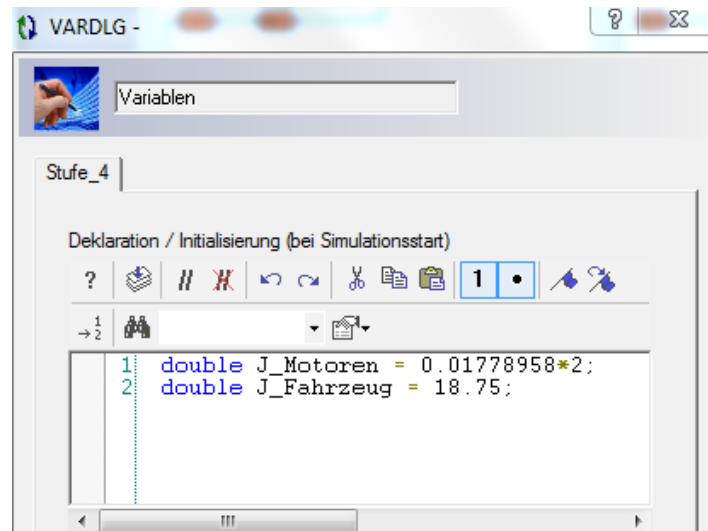


Abbildung 25: reale Trägheitsmomente (J_Motoren vgl. [5] S.122)

6.4.1 Abschnitte der Stufe 4

Alle fünf Abschnitte der Stufe 4 bauen auf denen der Stufe 3 auf und erfüllen weiterhin dieselben Funktionalitäten wie diese. Jedoch wurden die Abschnitte „realer Aufbau“, „Vergleichsmodell“ und „Referenzwertbildung“ um die Modellobjekte $G(s)$ (*Verzögerung...*) erweitert, welche die oben beschriebenen Verzögerungsglieder bilden. Im Teil „Regelung“ sind die Parameter der Regler optimiert worden. Der Abschnitt „Drehmomentenvorgabe“ ist identisch geblieben. In Anlage 4 können diese Abschnitte im Detail betrachtet werden.

6.4.2 Betrachtung der Simulationsergebnisse von Stufe 4

Im Vorfeld dieser Betrachtung werden die einzelnen Drehzahlverläufe aus Abbildung 26 kurz erläutert, um deren Hintergrund eindeutig darzulegen. Die beiden blauen Kurven sind die Drehzahlverläufe aus dem Vergleichsmodell, wobei die Hellblaue ($N_{sol/2_2}$) den unverzögerten Verlauf widerspiegelt und die dunkelblaue Kurve ($N_{sol/2}$) den verzögerten Verlauf entspricht. Die rote Kurve ist der Drehzahlsollwert aus der Referenzwertbildung ($N_{sol/}$) und die Grüne ist

der sich ergebende simulierte Istdrehzahlverlauf (N_{ist}) am Prüfstand aus dem Abschnitt „realer Aufbau“.

Das durch die Abbildung 26 dargestellte Simulationsergebnis, zeigt auf den ersten Blick eine näherungsweise gute Übereinstimmung aller Verläufe. Bei genauerer Betrachtung für $t = 25$ s und $t = 55$ s erkennt man, dass sich der unverzögerte Verlauf (N_{sol2_2}) deutlich von den anderen unterscheidet. Dieser ergibt sich bei sprunghaften Drehmomentenänderungen mit sehr steilen Anstiegen. Da ein solcher Verlauf aber nicht die Realität verkörpert, sind die Kurven N_{sol1} und N_{sol2} ein besseres Abbild der Realität. Diese nähern sich allmählich einem Endwert an und weisen keine sprunghaften Eigenschaften mehr auf. Der Drehzahlwert kann diesen beiden Verläufen an bestimmten Zeitpunkten weiterhin nicht korrekt folgen, weil auch in dieser Stufe die steilen Anstiege einer jeden Drehmomentenänderung im ersten Moment zu groß sind und sich damit auf das dynamische Moment an der Welle (siehe Abbildung 27) sowie auf die Istdrehzahl auswirken. Es kann daher festgehalten werden, dass sich bei jeder „positiven“ Änderung (beschleunigen, vom Bremspedal gehen) des Drehmomentenverlaufs eine Drehzahlsteigerung im ersten Augenblick ein-

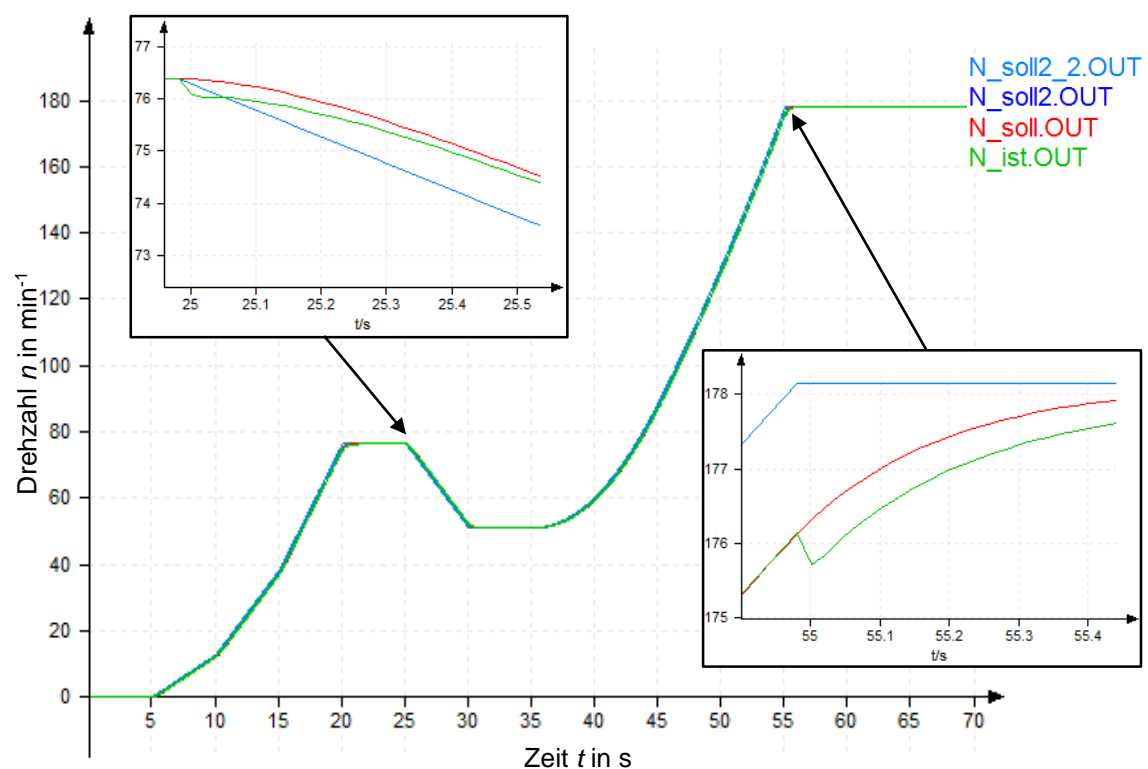


Abbildung 26: Drehzahlverläufe der Stufe 4

stellt und demnach auch bei jeder „negativen“ Änderung (bremsen, vom Gaspedal gehen, lineare Beschleunigung verringern) eine Drehzahlreduzierung die Folge ist.

Weiterhin kann durch Abbildung 27 nachgewiesen werden, dass die Drehmomentenrekonstruktion nach wie vor funktioniert und die Verzögerungsglieder den Drehmomentenverlauf wie gewünscht realistischer wirken lassen. Außerdem ist durch den Faktor 100 an den grünen Kurven der Abbildung 27 ersichtlich, dass sich das Verhältnis der dynamischen Momente deutlich verändert hat. Dies ist eine Folge, welche auf der Verwendung von den realen Trägheitsmomenten beruht. Weiterhin hat sich der Drehzahldwert aus Abbildung 26 im Vergleich zum Drehzahldwert aus Abbildung 21, auch aus diesem Grund, verändert.

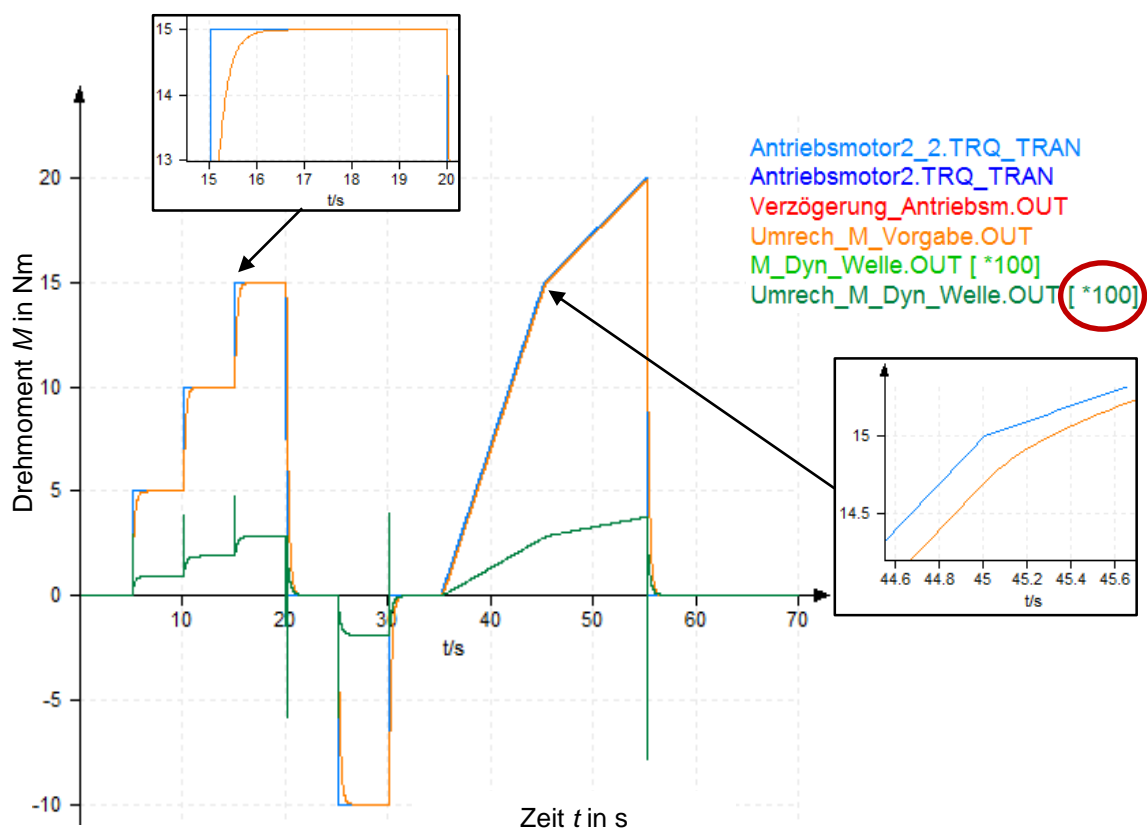


Abbildung 27: Darstellung der jeweiligen Momente

7 Abschließende Bemerkungen

7.1 Bewertung der Simulationsmodelle

Abschließend kann festgehalten werden, dass in allen vier Stufen eine geeignete Regelstruktur zur Abbildung der zwei gleichen, starr gekoppelten Motoren modelliert wurde und eine entsprechende Überprüfung der simulierten Trägheitsmomente in jeder Stufe stattfand. Weiterhin ist eine variable Einstellung des Fahrzeugträgheitsmomentes durch eine veränderbare Variable (Abbildung 25) realisiert worden, womit theoretisch jede Fahrzeugmasse simuliert werden kann. Die geforderte Ermittlung des Momentes des Antriebsmotors konnte mit der dritten Simulationsdatei umgesetzt werden. Was die Berechnung des Bremsmomentes zur Trägheitsnachbildung angeht, so kamen zwei mögliche Ansätze in den Stufen 1 und 2 zur Anwendung. Wobei sich der Ansatz aus Stufe 2, eine Regelung zu benutzen, gegen den Ansatz aus Stufe 1, der auf Gleichung (5.14) beruht, durchgesetzt hat. Hauptgrund dafür ist der entscheidende Vorteil den Drehzahlwert ständig mit dem Drehzahlsollwert vergleichen zu können. Außerdem hätte eine Kombination von Gleichung (5.14) mit den Verzögerungsgliedern eine starke Abweichung von Ist- und Solldrehzahlverlauf zur Folge gehabt (siehe Anlage 5), weil mit der Gleichung (5.14) der genaue Verlauf des Bremsmomentes für den jeweiligen Drehzahlverlauf ermittelt und dann im Modellobjekt $G(s)$ (*Verzögerung_Trägheitsm*) verzögert wird, stellt sich ein erhöhtes dynamisches Moment an der Welle ein. Somit erfüllt die Simulationsdatei der Stufe 4 alle Aufgaben und liefert realitätsnahe Simulationsergebnisse.

7.2 Einschätzung zur späteren Umsetzung

Für die spätere Umsetzung des simulierten Motorenprüfstandes sind die Ungenauigkeiten der Motoren potenzielle Fehlerquellen. Daher sollte eine messtechnische Überprüfung der Angaben aus [5] S. 48 zur Drehmomentengenauigkeit der Motoren in Erwägung gezogen werden, um durch eine Implementierung von einer Kennlinie den Ungenauigkeiten der Motoren entgegenwirken zu können. Weiterhin ist eine Bestimmung der realen Verzögerungskonstante für den Ab-

schnitt „Referenzwertbildung“ im Simulationsmodell der Stufe 4 erforderlich. Eine Herausforderung könnte auch das genaue Einstellen des dynamischen Momentes an der realen Prüfstandswelle werden. Weil sich aufgrund des geringen Trägheitsmoment der Prüfstandsmotoren ebenfalls ein geringes dynamisches Moment an der Welle, durch das Zusammenwirken beider Motoren, nach Gleichung (5.6) einstellen muss (siehe Abbildung 28). Dies ist für das Simulationsprogramm hier kein Problem, könnte aber bei der realen Umsetzung in Verbindung mit den Drehmomentenungenauigkeiten der Motoren Schwierigkeiten bereiten. Deshalb ist eine Erhöhung des Trägheitsmomentes des Prüfstandes empfehlenswert, damit das dynamische Moment an der realen Welle größer wird und eine drastische Verfälschung durch mögliche Ungenauigkeiten ausgeschlossen werden kann.

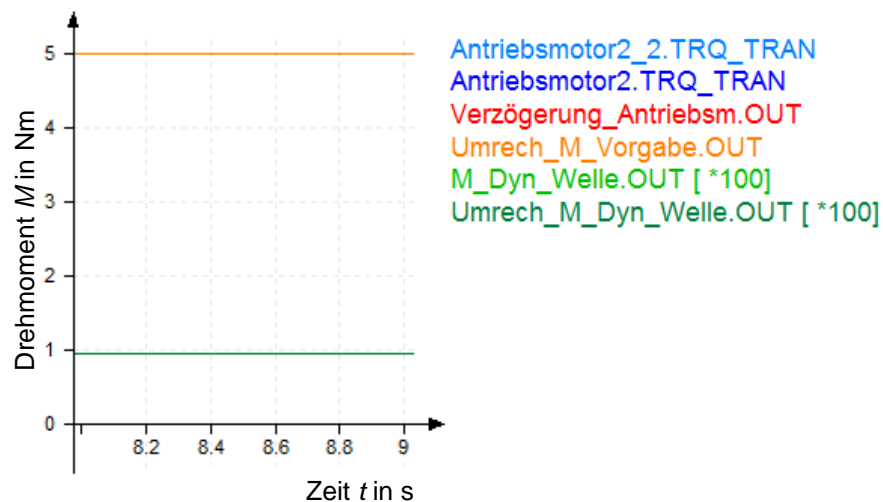


Abbildung 28: Größenunterschied der Momente

Formelzeichenverzeichnis

ω	Winkelgeschwindigkeit	s^{-1}
ω_{Rad}	Winkelgeschwindigkeit des Fahrzeugrades	s^{-1}
ω_{Welle}	Winkelgeschwindigkeit der Antriebswelle	s^{-1}
n	Drehzahl	min^{-1}
t	Zeit	s
M	Drehmoment	Nm
M_{dyn}	dynamisches Drehmoment	Nm
M_{dyn_Fzg}	wirkendes dynamisches Drehmoment bei realer Fahrzeugmasse	Nm
$M_{dyn_Motoren}$	wirkendes dynamisches Drehmoment bei simulierter Fahrzeugmasse	Nm
$M_{i_reales_Fzg}$	inneres Drehmoment des Fahrzeugantriebsmotor	Nm
$M_{i_Prüfstand}$	inneres Drehmoment des Prüfstandantriebsmotor	Nm
$M_{Trägheit}$	Drehmoment des Belastungsmotors zur Trägheitsnachbildung	Nm
$M_{Systemvorgabe}$	Drehmoment das dem System vorgegeben wird	Nm
J	Trägheitsmoment	kgm^2
J_{Fzg}	Trägheitsmoment des Gesamtfahrzeuges	kgm^2
J_{Fzg_Welle}	Trägheitsmoment des Gesamtfahrz. bezogen auf die Welle	kgm^2
$J_{Motoren}$	Trägheitsmoment der Prüfstandsmotoren	kgm^2
m_{Fzg}	Masse des Fahrzeuges	kg
r_{Rad}	Radradius	m
s	Laplace-Operator	s^{-1}
e	Regeldifferenz	(min^{-1})
y	Stellgröße / Reglerausgangsgröße	(Nm)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: grobe schematische Darstellung des getriebelosen Prüfstandes ..	2
Abbildung 2: Drehzahlverlauf bei unterschiedlichen Trägheitsmomenten J	2
Abbildung 3: Bibliotheken von Portunus	5
Abbildung 4: grafische Oberfläche von Portunus	6
Abbildung 5: Darstellung von Verläufen	6
Abbildung 6: Umrechnung des Drehmomentes in eine Drehzahl	7
Abbildung 7: Umrechnung einer Drehzahl in ein Drehmoment	8
Abbildung 8: Modellobjekt 2D Zeitfunktion	12
Abbildung 9: Erstellung eines Drehmomentenverlaufes	13
Abbildung 10: Realisierung des Abschnittes „Vergleichsmodell“	13
Abbildung 11: Modellierung Antriebsmotor, Belastungsmotor (Trägheitsmotor) und Welle	14
Abbildung 12: Motorenmodellierung	14
Abbildung 13: Verwendung der Übertragungsfunktion aus 4.1	15
Abbildung 14: Anwendung der Gleichung (5.14)	15
Abbildung 15: Vergleich der Drehzahlverläufe	16
Abbildung 16: Bestätigung der Gleichung (5.6)	16
Abbildung 17: Änderung im Abschnitt „realer Aufbau“	18
Abbildung 18: Bildung des Drehzahlsollwertes	18
Abbildung 19: Abschnitt „Regelung“	19
Abbildung 20: Regeldifferenz e und Stellgröße $y(u)$	19
Abbildung 21: Drehzahlvergleich	20
Abbildung 22: Überprüfung von Gleichung (5.6)	21
Abbildung 23: Erweiterung des Abschnittes „Referenzwertbildung“	22
Abbildung 24: Drehmomentenrekonstruktion	23
Abbildung 25: reale Trägheitsmomente (J_{Motoren} vgl. [5] S.122)	25
Abbildung 26: Drehzahlverläufe der Stufe 4	26
Abbildung 27: Darstellung der jeweiligen Momente	27
Abbildung 28: Größenunterschied der Momente	29

Literaturverzeichnis

a.) verwendete Literatur

- [1] Elflein, Nicole: Elektromobilität Antrieb für den Grubengiganten. URL: <<http://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/mobilitaet-uns-antriebe/electromobilitaet-der-staerkste-truck-der-welt.html>>, 26.01.2015.
- [2] Portunus. URL: <http://www.adapted-solutions.com/web/pdf/PortunusInfoD_A_10.pdf>, 05.01.2015.
- [3] Portunus Überblick. URL: <<http://www.adapted-solutions.com/web/ASProduktPortunusUeberblick.html>>, 05.01.2015.
- [4] Beier, Thomas; Wurl, Petra: Regelungstechnik: Basiswissen, Grundlagen, Anwendungsbeispiele. – Aufl. 1 – Ort: München, Carl Hanser Verlag, 2013.
- [5] *BOSCH*: Technische Kundenunterlage. Dateibezeichnung: <0437K00048_PK057_TCD_standard_edrive_V3_1_April2014.pdf>, Datum: 14 April 2014.

b.) weiterführende Literatur

- [6] Föllinger, Otto †. Bearb: Konigorski, Ulrich; Lohmann, Boris; Roppenecker, Günter; Trächtler, Ansgar: Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. – Aufl. 11 – Ort: Berlin, Offenbach, VDE VERLAG GMBH, 2013.

Anlagen

Anlage 1: Simulationsdatei der Stufe 1.....A-1

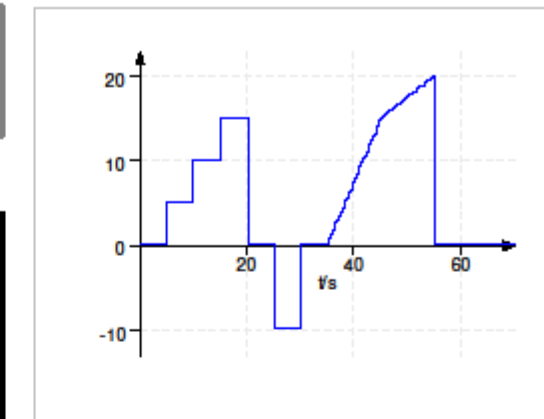
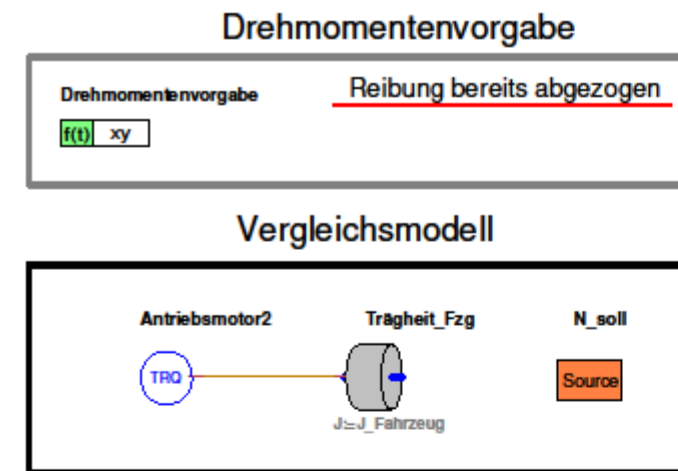
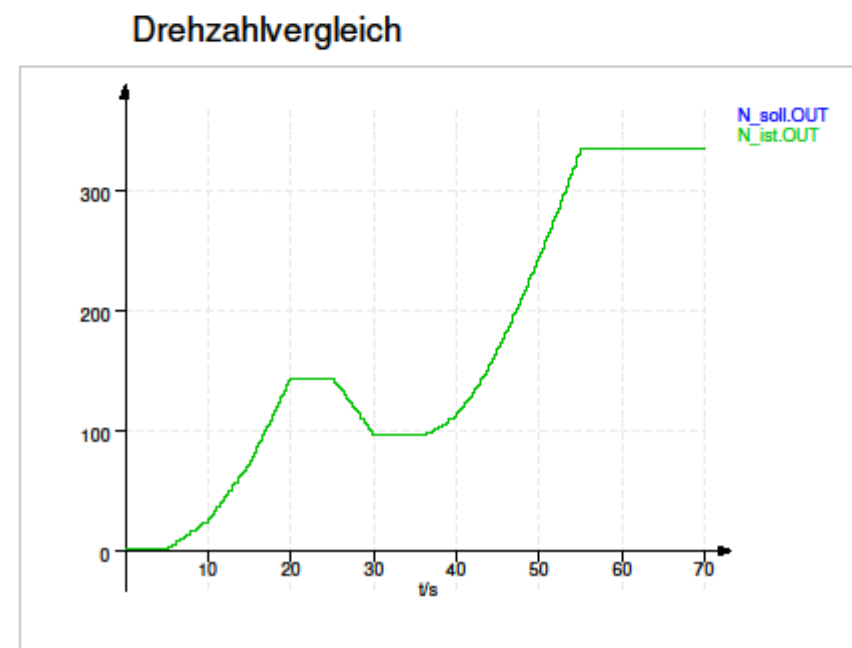
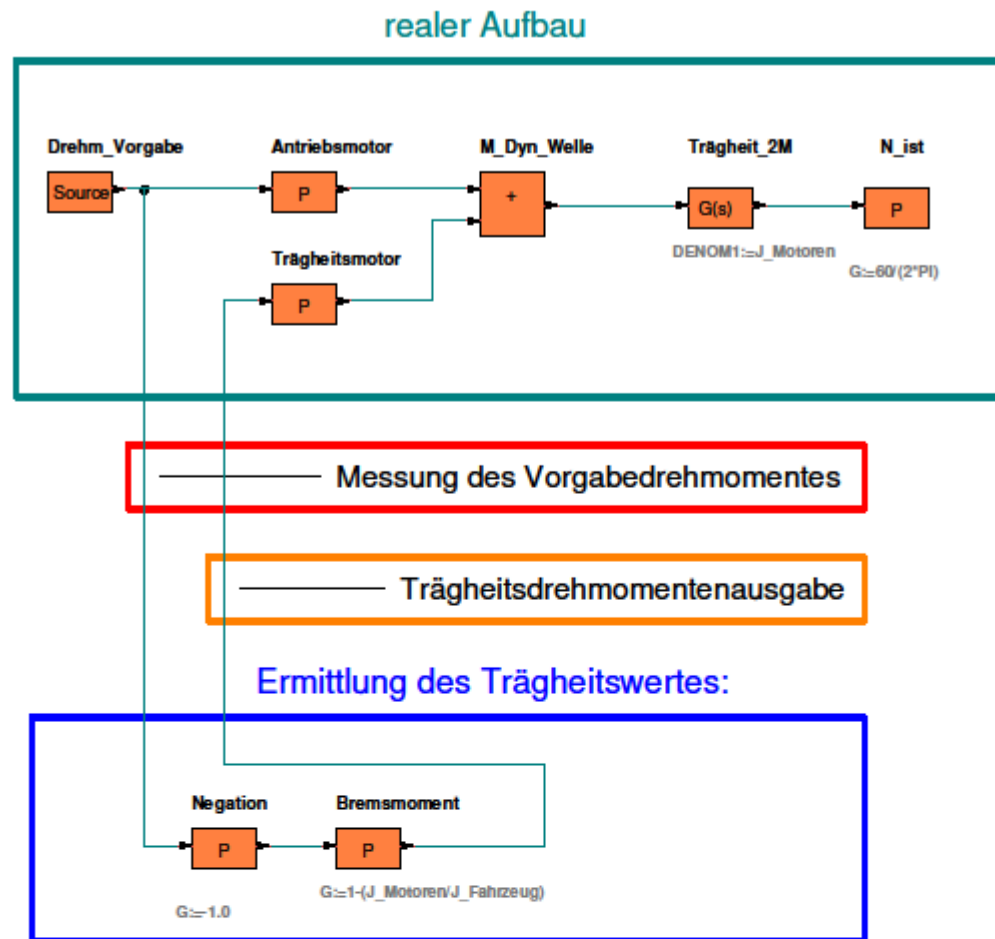
Anlage 2: Simulationsdatei der Stufe 2.....A-2

Anlage 3: Simulationsdatei der Stufe 3.....A-3

Anlage 4: Simulationsdatei der Stufe 4.....A-4

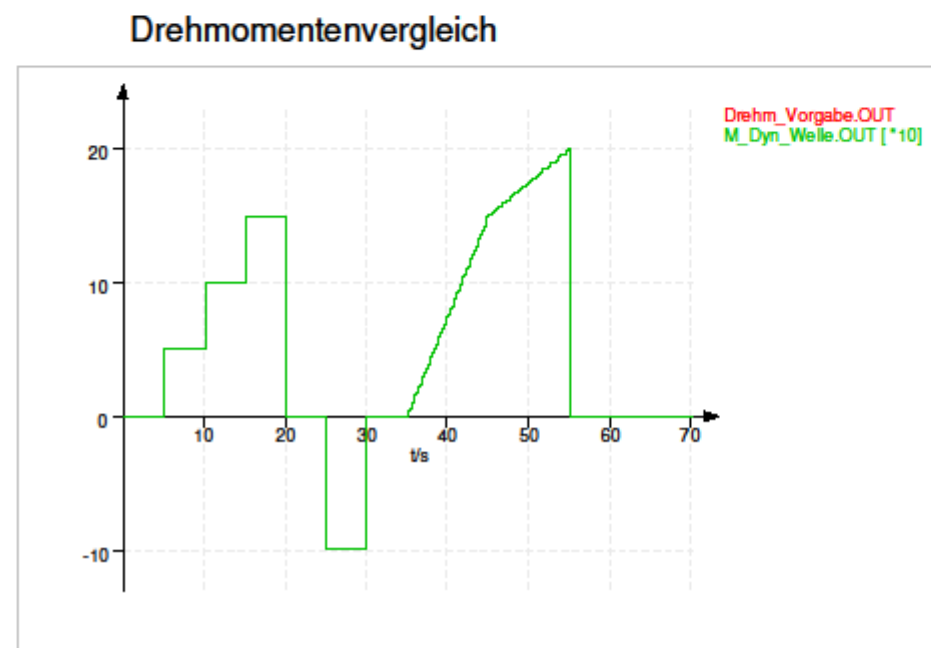
Anlage 5: Simulationsdatei der Stufe X (1b)A-5

Anlage 1: Simulationsdatei der Stufe 1

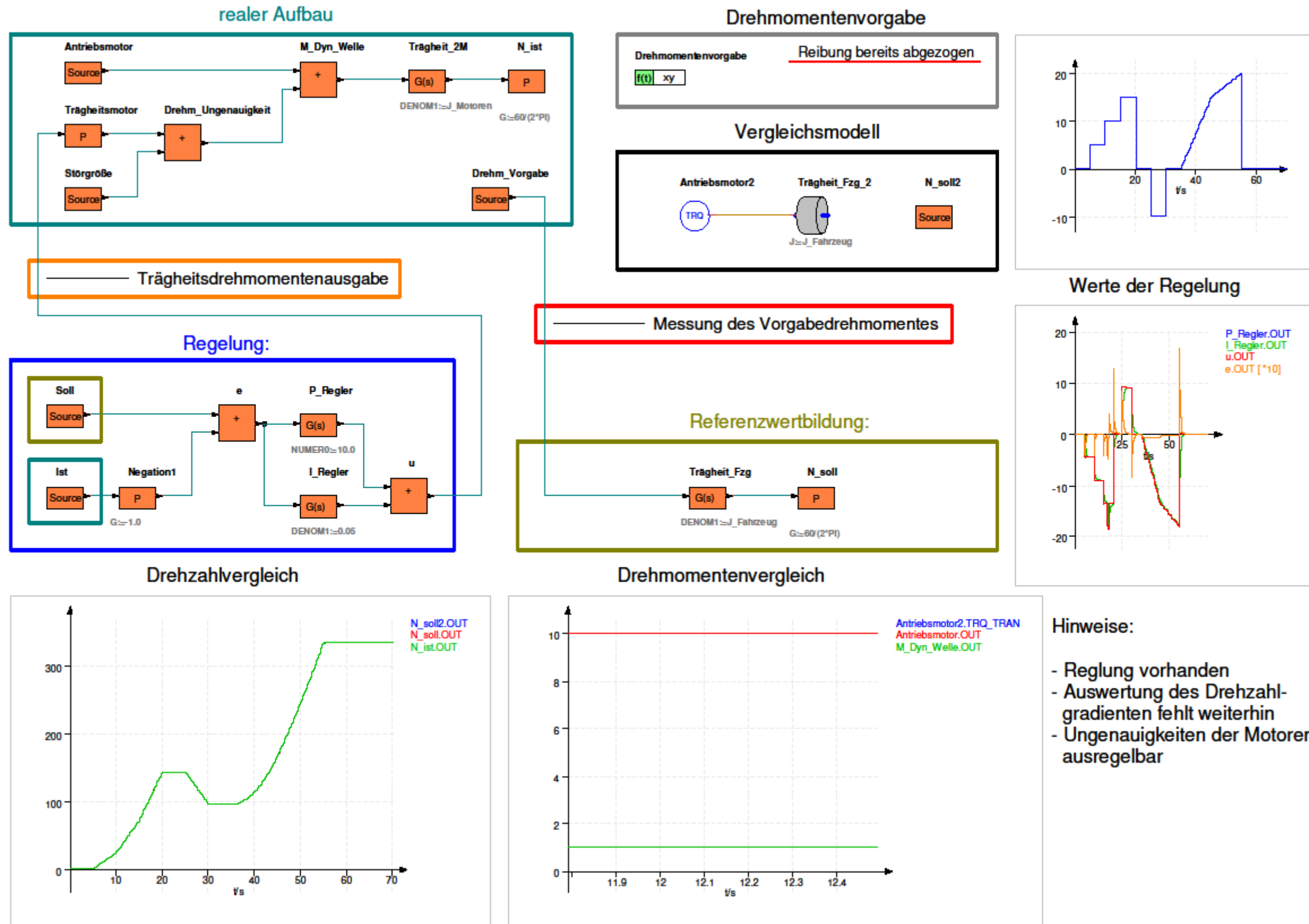


Hinweise:

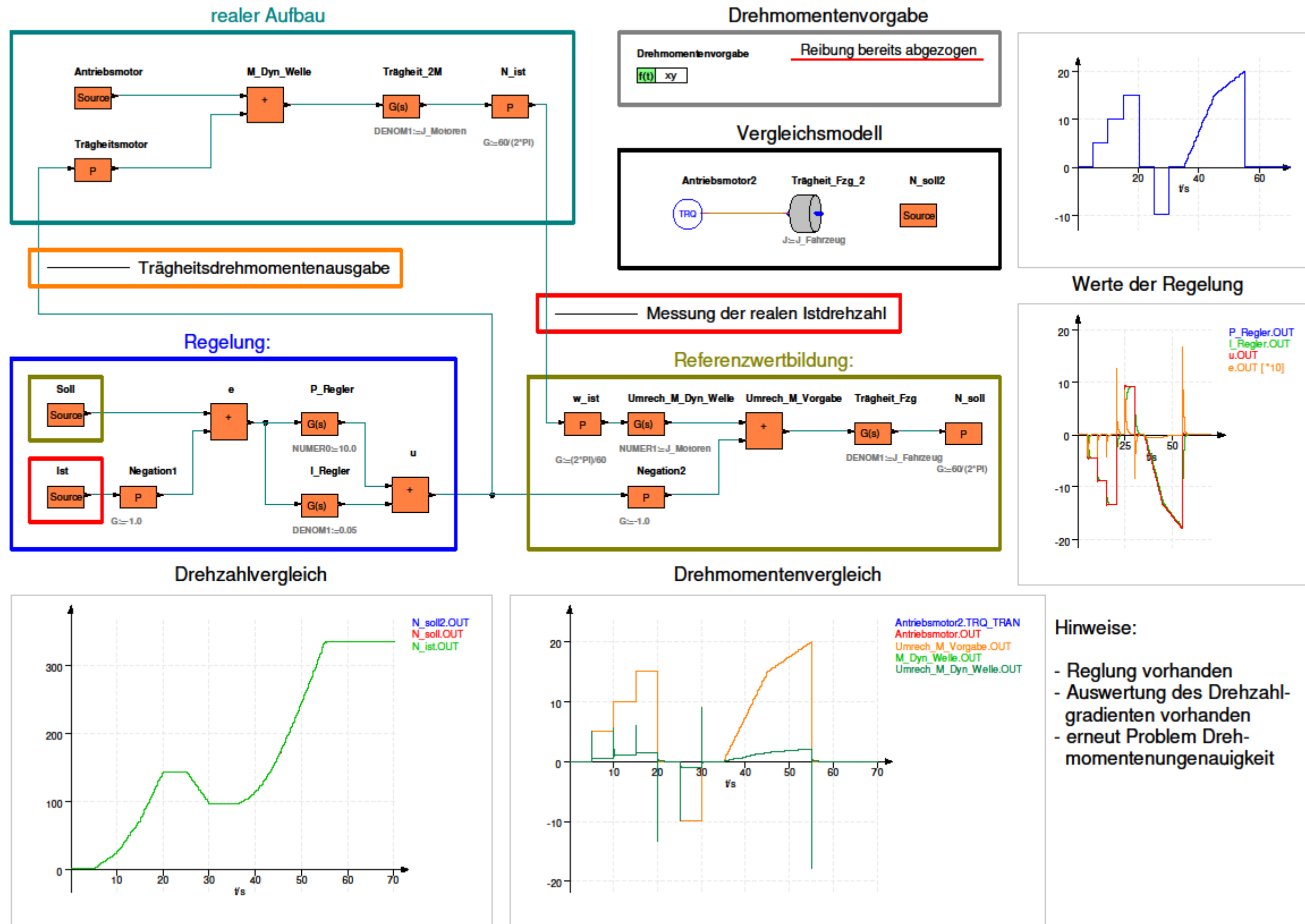
- keine Regelung
- Auswertung des Drehzahlgradienten fehlt
- Ungenauigkeiten der Motoren nicht ausregelbar



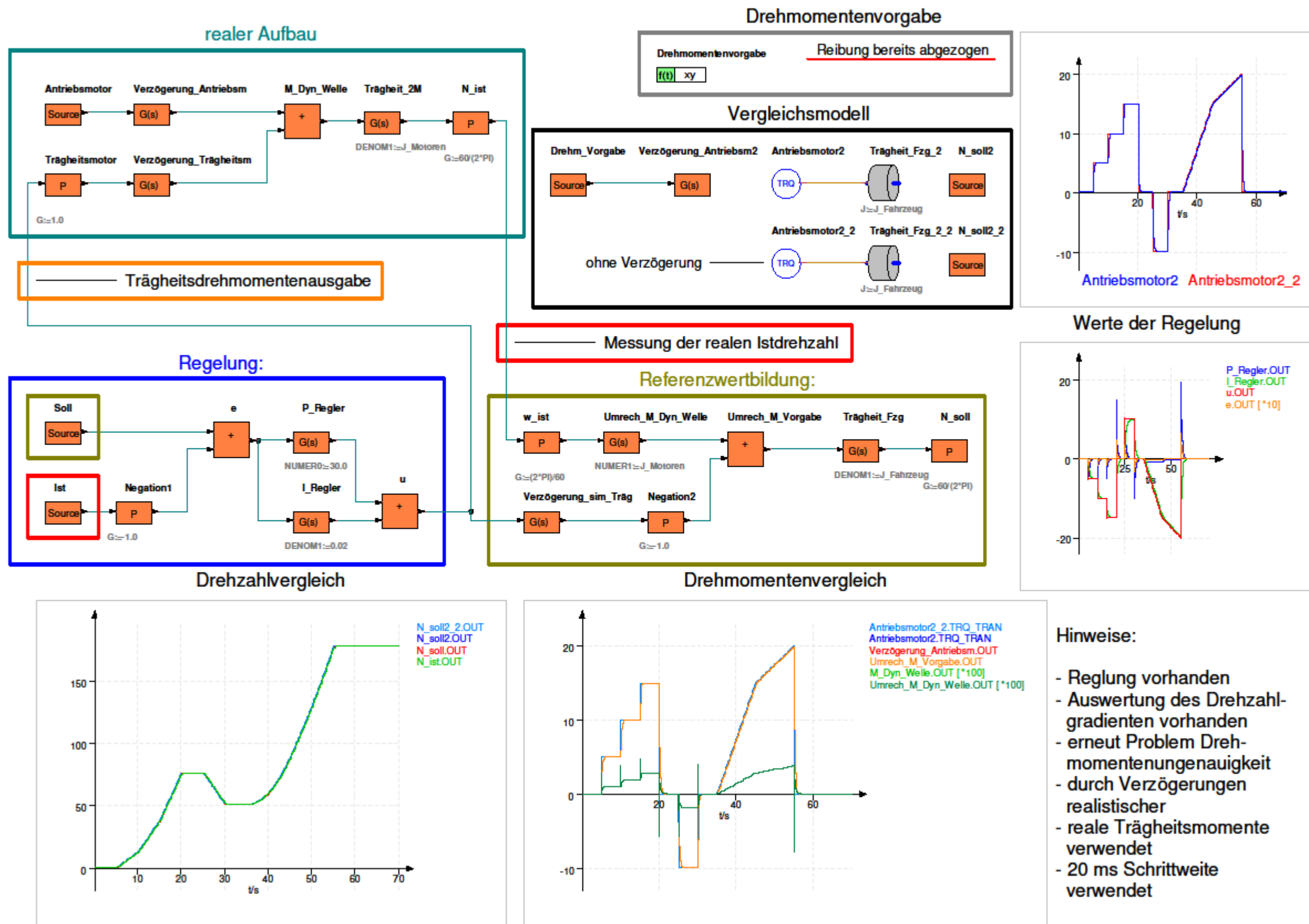
Anlage 2: Simulationsdatei der Stufe 2



Anlage 3: Simulationsdatei der Stufe 3



Anlage 4: Simulationsdatei der Stufe 4



Anlage 5: Simulationsdatei der Stufe X (1b)

